OHM 电子电气入门丛书

电子电气读本系列 1

# 图解 电工学入门

〔日〕 OHM社 编




科学出版社 OHM社

(TN-0282.0102)
责任编辑 魏 玲 樊友民
责任制作 朱静雨 李海娜 魏 谨
封面制作 李 祥

## 本书内容简介

本套丛书系引进欧姆社版权翻译出版的中文版图书，基本涵盖了有关电子电气方面的全面知识，内容简洁，重点突出，同时配以大量插图帮助讲解，具有较高的参考阅读价值。

本书分八个专题介绍了电、磁、静电、交流电、电学测量等方面的基本知识，各章末均附有练习题，并作出了相应的答案，便于读者复习巩固所学知识。

本书图文并茂，通俗易懂，既可作为初步电工学与电子学专业学生的入门书，也适合于函授或自学，还可作为相应领域工程技术人员的一本实用手册。

OHM 电子电气入门丛书

电子电气读本系列

图解电工学入门

图解电子学入门

图解日英汉电气／电子／信息词典

ISBN 7-03-008287-7

9 787030 082879 >

ISBN 7-03-008287-7/TN · 282

定 价：25.00 元

OHM 电子电气入门丛书
电子电气读本系列 1

图解

# 电工学入门

〔日〕 OHM 社 编
何希才 薛永毅 张建荣 译
卢乃洪 校

科学出版社 OHM 社
2001 北京

**图字：01－1999－1847号**

Original Japanese edition

Etoki Denkigaku Nyumon Hayawakari (kaitei 2-Han)

by Fumihiro Kumagai, Masahiro Oshima, Yasushi Murano, Hiroshi Iwamoto Tadaaki Kimoto

Copyright © 1996 by Ohmsha, Ltd.

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2000

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

絵とき

**電気学入門早わかり(改訂 2 版)**

**オーム社 編 オーム社 1996 改訂 2 版第 1 刷**

**图书在版编目(CIP)数据**

图解电工学入门／（日）OHM 社编；何希才等译．

－北京：科学出版社，2000. 7

ISBN 7－03－008287－7

Ⅰ. 图… Ⅱ. O… Ⅲ. 电工学－基本知识－图解

Ⅳ. TM1－64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 02205 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码 100717

http://www.sciencep.com

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

http://www.okbook.com.cn

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2000 年 7 月第 一 版 开本：A5(890×1240)

2001 年 10 月第 二次印刷 印张：9 1/8

印数：5 001—8 000 字数：237 000

**定 价：25.00 元**

（如有印装质量问题，我社负责调换 <新欣>）

# 前　言

常常听到“电难以理解”的说法。我们认为原因在于：“电是用眼睛看不见的”，对于初学者来说，就好像是立在面前的一道墙，难以逾越。为了理解抽象的电气术语和内容解释，就需要打通这道墙，若把一个个电学现象与电的工作状态同日常生活中的事例进行对比，通过眼睛来观察，进而理解电是什么，再进一步了解电的各种应用，则是很好的学习方法。本书不仅采用了这些方法，而且，采用了图解的方式，希望本书能成为初学者从入门走向精通的桥梁，这也是策划本书的目的。

现在的工科高等学校专科开设的“电工基础”课程，一般是学习传统的电工学和电子学的基础知识。本书立足于“电工基础”，针对电工学专业和电子学专业学生共同需要的基础知识，按照各个主题，采用独特的插图，使本书成为以图解为主的读物。

本书虽然是以初学者为主要读者对象，但对于活跃在现场的工程师和需要考级的电工来说，如果他们需要从头开始重新学习电子、电工基础的话，本书也是有用的。尽管从学习最新技术的角度看，再从头开始学习电工学与电子学的基础知识，似乎是舍近求远，但这正是尽快成为“电子能手”的捷径，难道不是这样吗！

本书第一版发表于 1980 年 6 月《新电工》杂志的增刊上。后来，作为面向初学者的入门书正式出版，成为广大读者喜爱的一本书。

此后，随着“电工基础”课程的变革，分出“电子电路篇”，并对电工符号、SI 单位等进行修订，成为现在的第 2 版。

欧姆社新电工编辑部

---

本书的编著者均为“电工基础研究会”的成员，执笔者为：

岩本　洋　　大岛正弘

熊谷文宏　　村野　靖

# 目　录


## 前　言

## 图解电学发展史

## 1. 电学基础

本章要点及学习方法 28
电的本质 30
电的要素 32
欧姆定律 34
电　路 36
开关电路 38
电阻的串联与并联 40
倍率器的作用 42
分流器 44
可变电阻器的利用 46
基尔霍夫定律 48
电桥电路 50
整　流 52
SI 单位制 54
元件和图形符号 56

## 2. 电流的作用

本章要点及学习方法 60
电阻的性质 62
电阻的温度系数 64
绝缘电阻 66
接地电阻 68
功与电功率 70
焦耳定律 72
电　热 74
电线的允许电流 76
电　池 78
其他电池 80
铅蓄电池 82
热电动势 84
珀耳帖效应与压电现象 86
光电转换 88

## 3. 磁 作 用

本章要点及学习方法 92
磁　铁 94
库仑定律 96
磁力线和磁通量 98
地　磁 100
磁性体 102
电流与磁 104
磁学中的欧姆定律 106
电磁铁 108
电磁铁的应用 110
永磁电动机 112
发电原理 114
变电原理 116
电　感 118
感应线圈 120

## 4. 静电的作用

本章要点及学习方法 124
何谓静电 126
静电的功与过 128
电　场 130
电力线与电通量 132
电位与尖端放电 134




放电现象 136
电位梯度与绝缘能力 138
电容器 140
故障诊断 142
电容量 144
电容器的串并联 146
电容器的耐压 148
触摸开关 150
电容器的充放电 152

## 5. 交流电基础

本章要点及学习方法 156
交流电的产生 158
角频率与瞬时值 160
频率与波长的关系 162
平均值与有效值 164
正弦波的矢量表示法 166
纯电阻电路 168
纯电感电路 170
纯电容电路 172
*RL* 串联电路 174
*RC* 串联电路 176
*RLC* 串联电路 178
*LC* 串联谐振 180
*RLC* 并联电路 182
*LC* 并联谐振 184

## 6. 交流电路

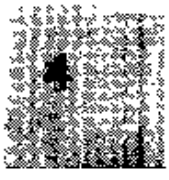
本章要点及学习方法 188
直流坐标表示法 190
三角函数 192
极坐标表示法 194
*RLC* 电路的计算 196
交流电桥 198
矢量的轨迹 200
三相交流电的产生 202
Y－Y 连接 204
△－△连接 206
交流功率因数 208
功率的测量 210
电力的需求与输送 212
变压器 214
旋转磁场 216

## 7. 电量的测量

本章要点及学习方法 220
测量误差 222
动圈式测量仪表 224
检流计的种类 226
高频测量仪表 228
交流电表 230
高电压与大电流的测量 232
电路测试器(万用表) 234
万用表的欧姆表功能 236
接地电阻的测量 238
应变(变位)的测量 240
转速的测量 242
温度的测量 244
遥 测 246
放射线的测量 248

## 8. 波形与测量

本章要点及学习方法 252
正弦波 254
失真波 256
脉冲波 258
方波与正弦波 260
过渡现象 262
时间常数 264
锯齿波 266
示波器的原理 268
同步示波器的使用方法 270
周期与时间的测量 272
数字式频率计 274
吸收式及外差式频率计 276
Q 表的原理 278
电子(电子管)电压表 280



# 前　言

常常听到“电难以理解”的说法。我们认为原因在于:“电是用眼睛看不见的”,对于初学者来说,就好像是立在面前的一道墙,难以逾越。为了理解抽象的电气术语和内容解释,就需要打通这道墙,若把一个个电学现象与电的工作状态同日常生活中的事例进行对比,通过眼睛来观察,进而理解电是什么,再进一步了解电的各种应用,则是很好的学习方法。本书不仅采用了这些方法,而且,采用了图解的方式,希望本书能成为初学者从入门走向精通的桥梁,这也是策划本书的目的。

现在的工科高等学校专科开设的“电工基础”课程,一般是学习传统的电工学和电子学的基础知识。本书立足于“电工基础”,针对电工学专业和电子学专业学生共同需要的基础知识,按照各个主题,采用独特的插图,使本书成为以图解为主的读物。

本书虽然是以初学者为主要读者对象,但对于活跃在现场的工程师和需要考级的电工来说,如果他们需要从头开始重新学习电子、电工基础的话,本书也是有用的。尽管从学习最新技术的角度看,再从头开始学习电工学与电子学的基础知识,似乎是舍近求远,但这正是尽快成为“电子能手”的捷径,难道不是这样吗!

本书第一版发表于 1980 年 6 月《新电工》杂志的增刊上。后来,作为面向初学者的入门书正式出版,成为广大读者喜爱的一本书。

此后,随着“电工基础”课程的变革,分出“电子电路篇”,并对电工符号、SI 单位等进行修订,成为现在的第 2 版。

欧姆社新电工编辑部

本书的编著者均为“电工基础研究会”的成员,执笔者为:

岩本　洋　大岛正弘

熊谷文宏　村野　靖

# 目　录


前　言

图解电学发展史

## 1. 电学基础

本章要点及学习方法 28
电的本质 30
电的要素 32
欧姆定律 34
电　路 36
开关电路 38
电阻的串联与并联 40
倍率器的作用 42
分流器 44
可变电阻器的利用 46
基尔霍夫定律 48
电桥电路 50
整　流 52
SI 单位制 54
元件和图形符号 56

## 2. 电流的作用

本章要点及学习方法 60
电阻的性质 62
电阻的温度系数 64
绝缘电阻 66
接地电阻 68
功与电功率 70
焦耳定律 72
电　热 74
电线的允许电流 76
电　池 78
其他电池 80
铅蓄电池 82
热电动势 84
珀耳帖效应与压电现象 86
光电转换 88

## 3. 磁 作 用

本章要点及学习方法 92
磁　铁 94
库仑定律 96
磁力线和磁通量 98
地　磁 100
磁性体 102
电流与磁 104
磁学中的欧姆定律 106
电磁铁 108
电磁铁的应用 110
永磁电动机 112
发电原理 114
变电原理 116
电　感 118
感应线圈 120

## 4. 静电的作用

本章要点及学习方法 124
何谓静电 126
静电的功与过 128
电　场 130
电力线与电通量 132
电位与尖端放电 134

放电现象 136
电位梯度与绝缘能力 138
电容器 140
故障诊断 142
电容量 144
电容器的串并联 146
电容器的耐压 148
触摸开关 150
电容器的充放电 152

## 5. 交流电基础

本章要点及学习方法 156
交流电的产生 158
角频率与瞬时值 160
频率与波长的关系 162
平均值与有效值 164
正弦波的矢量表示法 166
纯电阻电路 168
纯电感电路 170
纯电容电路 172
*RL* 串联电路 174
*RC* 串联电路 176
*RLC* 串联电路 178
*LC* 串联谐振 180
*RLC* 并联电路 182
*LC* 并联谐振 184

## 6. 交流电路

本章要点及学习方法 188
直流坐标表示法 190
三角函数 192
极坐标表示法 194
*RLC* 电路的计算 196
交流电桥 198
矢量的轨迹 200
三相交流电的产生 202
Y－Y 连接 204
△－△连接 206
交流功率因数 208
功率的测量 210
电力的需求与输送 212
变压器 214
旋转磁场 216

## 7. 电量的测量

本章要点及学习方法 220
测量误差 222
动圈式测量仪表 224
检流计的种类 226
高频测量仪表 228
交流电表 230
高电压与大电流的测量 232
电路测试器(万用表) 234
万用表的欧姆表功能 236
接地电阻的测量 238
应变(变位)的测量 240
转速的测量 242
温度的测量 244
遥 测 246
放射线的测量 248

## 8. 波形与测量

本章要点及学习方法 252
正弦波 254
失真波 256
脉冲波 258
方波与正弦波 260
过渡现象 262
时间常数 264
锯齿波 266
示波器的原理 268
同步示波器的使用方法 270
周期与时间的测量 272
数字式频率计 274
吸收式及外差式频率计 276
Q 表的原理 278
电子(电子管)电压表 280

# A History of Electrical technology

# 图解 电学发展史

## 1 公元前的琥珀和磁石

公元前600年发现静电 泰勒斯

希腊七贤中有一位名叫泰勒斯的哲学家。公元前600年前后，泰勒斯看到当时的希腊人通过摩擦琥珀吸引羽毛，用磁铁矿石吸引铁片，曾对其原因进行过一番思考。据说他的解释是："万物皆有灵。磁吸铁，故磁有灵。"这里所说的"磁"就是磁铁矿石。

希腊人把琥珀叫做"elektron"（与电子同音）。他们从波罗的海沿岸进口琥珀，用来制作手镯和首饰。当时的宝石商们也知道摩擦琥珀能吸引羽毛，不过他们认为那是神灵或者魔力的作用。

指南针的应用 中国

在东方，中国人早在公元前2500年前后就已经具有天然磁石的知识。据《吕氏春秋》一书记载，中国在公元前1000年前后就已经有了指南针，他们在古代就已经用磁针来辨别方向了。

## 2 磁、静电和伏打电池



浮在水面上的磁针

14世纪发明航海罗盘

通常所说的摩擦起电，在公元前人们只知道它是一种现象。很长时间里，关于这一现象的认识并没有进展。

而罗盘则早在13世纪初就已经在航海中得到了应用。那时的罗盘是把加工成针形的磁铁矿石放在秸秆里，使之能浮在水面上。到了14世纪初，又制成了用绳子把磁针吊起来的航海罗盘。

这种罗盘在1492年哥伦布发现美洲新大陆以及1519年麦哲伦发现环绕地球一周的航线时发挥了重要作用。

### (1) 磁、静电与吉尔伯特



吉尔伯特向伊丽莎白女王展示实验

英国人吉尔伯特是伊丽莎白女王的御医，他在当医生的同时，也对磁进行了研究。他总结了多年来关于磁的实验成果，于1600年出了一本取名为《论磁学》的书。书中指出地球本身就是一块大磁石，并且阐述了罗盘的磁倾角问题。

1600年 磁的研究 吉尔伯特

吉尔伯特还研究了摩擦琥珀吸引羽毛的现象，指出这种现象不仅存在于琥珀上，而且存在于硫磺、树脂、玻璃、水晶、钻石等物质。现在，人们已经知道，毛皮、绒布、陶瓷、火漆、玻璃、纸、丝绸、琥珀、金属、橡胶、硫磺、赛璐珞等是摩擦起电物质系列。把这个系列中的两种物质互相摩擦，系列中排在前面的物质将带正电，排在后面的物质将带负电。

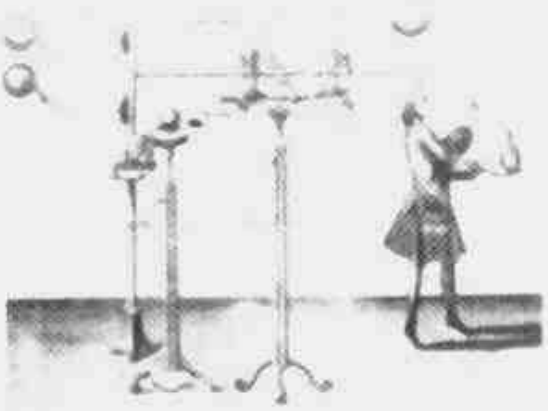
为了做静电实验，吉尔伯特还设计过一种叫做贝鲁索留姆旋转器的老式验电器。

那时候，主要的研究方法就是靠思考，而他主张真正的研究应该以实验为基础，他提出这种主张并付诸实践，在这点上，可以说吉尔伯特是近代科学研究方法的开创者。

### (2) 雷和静电

1748年 发明避雷针 富兰克林

在公元前的中国，打雷被认为是神的行为。说是有五位司雷电的神仙，其长者称为雷祖，雷祖之下是雷公和电



莱顿瓶实验

母。打雷就是雷公在天上敲大鼓，闪电就是电母用两面镜子把光射向下界。

到了亚里斯多德时代就已经比较科学了。认为雷的发生是由于大地上的水蒸气上升，形成雷雨云，雷雨云遇到冷空气凝缩而变成雷雨，同时伴随出现强光。

认为雷是由静电而产生的是英国人沃尔，那是亚里斯多德之后很久的1708年的事。1748年，富兰克林基于同样的认识设计了避雷针。

前面曾提到摩擦起电有正电和负电两种，给出正电和负电这两个名字的正是富兰克林(1747年)。

能不能用什么办法把这种静电收集起来？这个问题很多科学家都考虑过。1746年，莱顿大学教授缪森布鲁克发明了一种存贮静电的瓶子，这就是后来很有名的“莱顿瓶”。

1746年
发明莱顿瓶
缪森布鲁克

缪森布鲁克本来想像往瓶子里装水那样把电装进瓶子里，他首先在瓶子里灌上水，然后用一根金属丝把摩擦玻璃棒通到水里。就在他的手接触到瓶子和棒的一瞬间，他被重重地“电击”了一下。据说他曾这样说过：“就算是国王下命令，我也不想再做这种可怕的实验了”。



伽伐尼的青蛙实验

富兰克林联想到往莱顿瓶里蓄电的事，于1752年6月做了一个把风筝放到雷雨云里去的实验。其结果，发现了雷雨云有时带正电有时带负电的现象。这个风筝实验很有名，许多科学家都很感兴趣，也跟着做。1753年7月，俄罗斯科学家利赫曼在实验中不幸遭电击身亡。



伏打在拿破仑面前做实验



西林格的单针电报机

上一个磁针，磁针马上就发生偏转。

俄罗斯的西林格读了这篇论文，他把线圈和磁针组合在一起，发明了电报机（1831 年），这可说是电报的开始。

其后，法国的安培发现了关于电流周围产生的磁场方向问题的安培定律（1820 年），法拉第发现了划时代的电磁感应现象（1831 年），电磁学得到了飞速发展。

1826 年 发现欧姆定律 欧姆

另一方面，关于电路的研究也在发展。欧姆发现了关于电阻的欧姆定律（1826 年），基尔霍夫发现了关于电路网络的定律（1849 年）等，从而确立了电工学。

1831 年 发现电磁感应现象 法拉第



法拉第

## 3 有线通信的历史

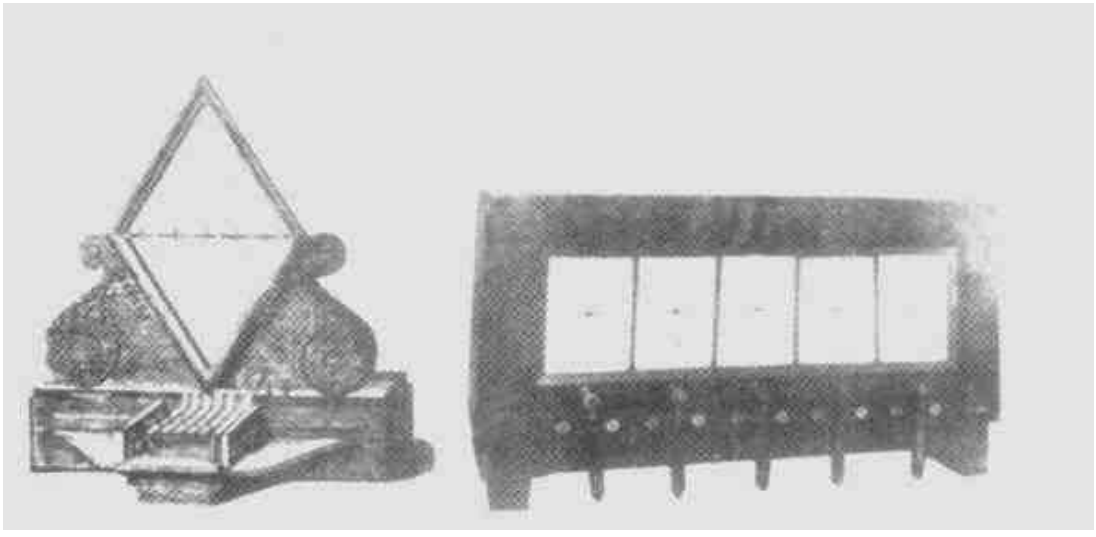
有人说科学技术是由于军事方面的需要而发展起来的，这种说法有一定的历史事实根据。

英国害怕拿破仑进攻，曾用桁架式通信机向自己的部队通报法国军队的动向。瑞典、德国、俄罗斯等国家也以军事为目的，架设了由这类通信机组成的通信网，据说都曾投入了庞大的预算。

将这种通信机改造成电通信方式的构想大概就是有线通信的开始。

**(1) 有线通信的原理**

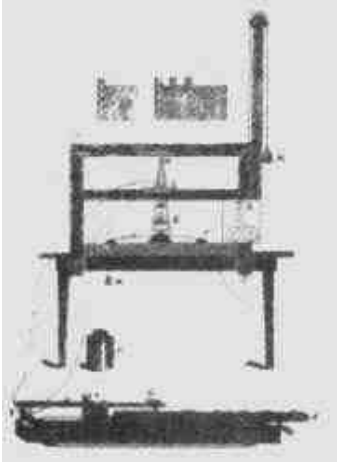
除了前面所讲到的西林格所发明的电磁式电报机以外，还有德国的简梅林格发明的电化学式电报机、高斯和韦伯（德国）的电报机、库克和惠斯通（英国）的 5 针式电报机



库克和惠斯通的5针式电报机

1837年
发明电报机
库克与惠斯通

等。电报机的形式也是各种各样的，有音响式、印刷式、指针式、钟铃式等。其中，库克和惠斯通的5针式电报机最为有名。1837年，这种电报机曾通过架设在伦敦与西德雷顿之间长达20公里的5根电线而投入实际使用。



莫尔斯电报机

### (2) 莫尔斯电报机

1837年，莫尔斯电报机在美国研制成功，发明人就是以莫尔斯电码而闻名的莫尔斯。莫尔斯电码是一种以点、划来编码的信号。

莫尔斯本来想当一名画家，他为此在伦敦留学。1815年，他在回美国的船上听了波士顿大学教授杰克逊关于电报的一席谈话，萌发了莫尔斯电码和电报机的构想。为了铺设电报线，莫尔斯成立了电磁－电报公司，并于1846年在纽约—波士顿、费城—匹兹堡、多伦多—布法罗—纽约之间开通了电报业务。

1837年
发明莫尔斯
电报机
莫尔斯

莫尔斯的事业获得了极大成功，于是就在美国各地创办电报公司，电报业务逐渐扩大起来。

1846年，莫尔斯电报机装上了音响收报机，使用也更加方便。

1876年
发明电话
贝尔和格雷

### (3) 电话和交换机

1876年2月14日，美国的两位发明家贝尔和格雷分别

递交了电话机专利的申请，贝尔的申请书比格雷的申请书早两个小时到达，因而贝尔得到了专利权。

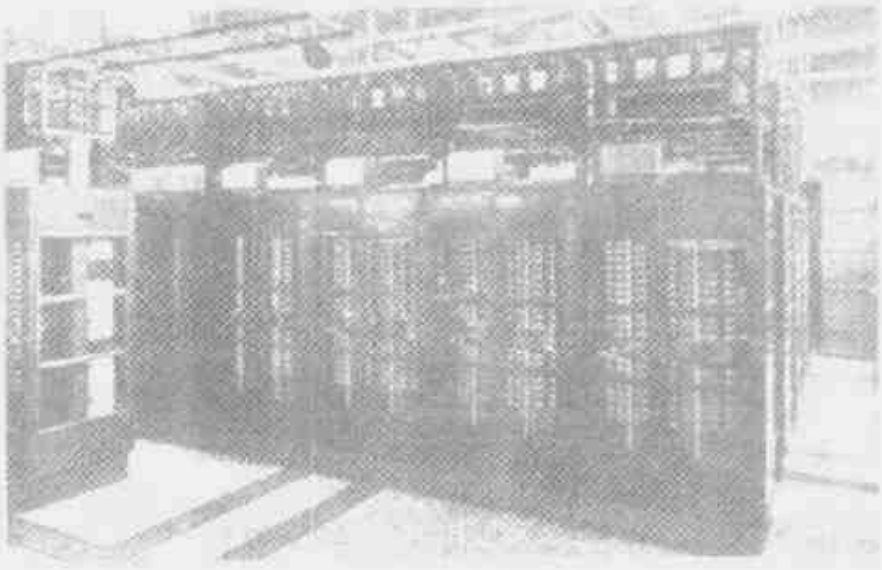
1878 年，贝尔成立了电话公司，制造电话机，全力发展电话事业。

从发展电话业务开始，交换机就担负着重要任务。1877 年前后的交换机称为传票式交换机，话务员收到通话请求，得把传票交给另一位话务员。

其后，经过反复改进，开发出了框图式交换机，进而又开发出了自动交换方式(1879 年)。

1891 年发明自动交换机 史端乔

1891 年，史端乔式自动交换机研制成功。至此，自动交换的愿望就算实现了。之后研究仍在继续，又经过了几个阶段才达到了现在的电子交换机。



史端乔式自动交换机

### (4) 海底通信电缆

陆上通信网日渐完备，人们开始考虑在海底敷设通信电缆来实现跨海国家之间的通信。1840 年前后，惠斯通就已经考虑到了海底电缆的问题。

1845 年敷设海底电缆 英国

海底电缆有很多问题需要解决，电缆的机械强度、绝缘及敷设方法等都与陆上电缆不同。



阿伽门农号敷设电缆船

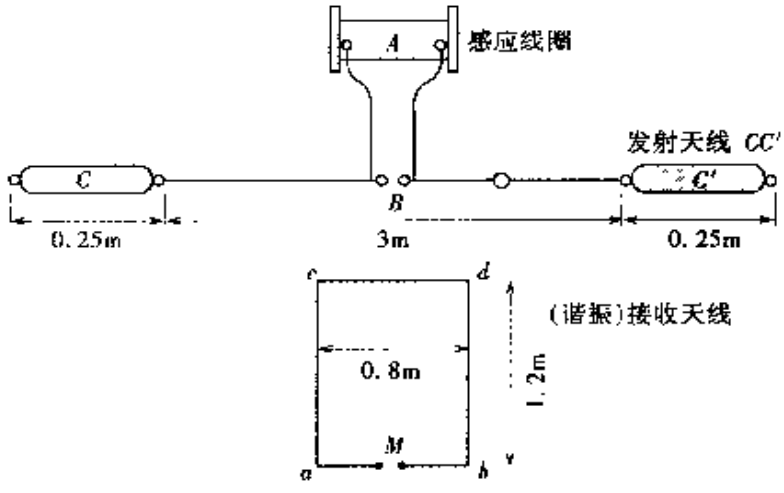
1845 年，英吉利海峡海底电报公司成立，开始了从英国到加拿大并跨过多佛尔海峡到达法国的海底电缆敷设工程。

海底电缆敷设中碰到了电缆断裂等大难题，但敷设海底电缆是时代的要求，各国都为此投入了力量。

1851 年，最早的加来—多佛尔海底电缆敷设完毕，成功地实现了通信。以此为契机，欧洲周边和美洲东部周边也敷设了许多电缆。

现在，世界上的大海里遍布着电缆，供通信使用。

## 4 无线通信的历史




赫兹的电磁波传播实验

世界上任何地区的信息都能显示在电视机上，这种方便是电波带给我们的。

最早的电波实验是德国的赫兹在 1888 年进行的。通过实验，赫兹弄清了电波和光一样，具有直线传播、反射和折射现象。

频率的单位赫[兹]就是来自他的名字。

**(1) 马可尼的无线电装置**

在杂志上读到过赫兹实验文章的意大利人马可尼，在



马可尼和他的无线电装置

1895 年研制出了最早的无线电装置，利用这一装置在相隔大约 3 公里远的距离之间进行了莫尔斯电码通信实验。他想到了要把无线通信企业化，就成立了一个无线电报与信号公司。

1899 年，跨越多佛尔海峡的通信得以成功，1901 年又成功地在距离英国 2700 公里的纽芬兰接收到了莫尔斯信号。

尽管马可尼在无线通信领域获得了诸多成功，但由于与海底电缆公司的利益相冲突，他想在纽芬兰设立无线电报局的事遭到了反对，马可尼的反对者还不在少数。

1895 年
发明无线电报
高频应用
马可尼

**(2) 高频波的产生**

要实现无线通信，首先要产生稳定的高频电磁波。

达德尔采用由线圈和电容器构成的电路产生出了高频信号，但频率还不到 50kHz，电流也只有 2～3A，比较小。

1903 年
高频应用
包鲁森

1903 年，荷兰的包鲁森利用酒精蒸气电弧放电产生出了 1MHz 的高频波，彼得森又对其进行了改进，制成了输出功率达到 1kW 的装置。

其后，德国设计出了机械式高频发生装置，美国的斯特拉和费森登、德国的戈尔德施米特等人开发出了用高频交流机产生高频波的方法等，很多科学家和工程师都曾致力于高频波发生器的研究。

**(3) 无线电话**

1906 年
发明
无线电话
亚历山德森

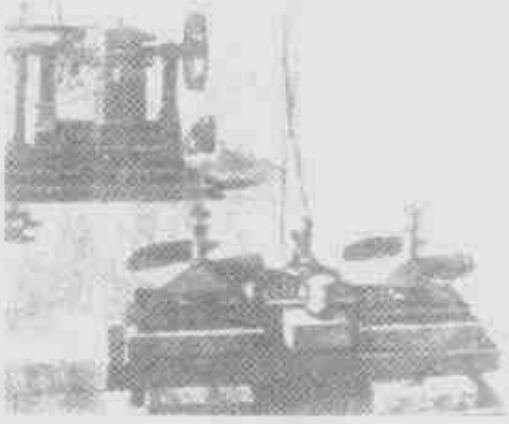
如果传送的不是莫尔斯信号而是人的语言，那就需要有运载语音信号的载波。载波必须是高频波。

1906 年，美国通用电气(GE)公司的亚历山德森制成了 80kHz 的高频信号发生装置，首次成功地进行了无线电话实验。

1913 年
发明外差式
接收机
费森登

用无线电话传送语音，并且要收听它，这就需要有用于发送的高频信号发生装置和用于接收的检波器。费森登设计了一种外差式接收装置，并于 1913 年试验成功。

达德尔设计出了以包鲁森电弧发送器为发送装置、以电解检波器为接收装置的受话器方式。在当时，由于都是采用火花振荡器，所以噪声很大。实验阶段可说是成功了，但离实用化还很远。



达德尔的高频发生装置

要想使产生的电波稳定，接收到的噪声小，还得等待电子管的出现。

**(4) 二极管和三极管**

1883 年，爱迪生发现从电灯泡的热丝上飞溅出来的电子把灯泡的一部分都熏黑了，这种现象被称为爱迪生效应。

1904 年发明二极管 弗莱明

1904 年，弗莱明从爱迪生效应得到启发，造出了二极管，用它来进行检波。



D. 福雷斯特和三极管

1907 年发明三极管 福雷斯特

1907 年，美国的 D. 福雷斯特在二极管的阳极和阴极之间又加了一个叫做栅极的电极，发明了三极管。

这种三极管既可用于放大信号电压，也可配以适当的反馈电路产生稳定的高频信号，可说是一个划时代的电路元件。

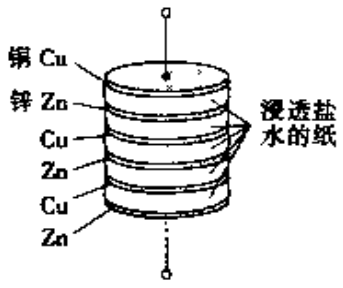
三极管经过进一步改进，能够产生短波、超短波等高频信号。此外，三极管具有能控制电子流的功能，随后出现的阴极射线管和示波器与此有密切的关系。

## 5 电池的历史

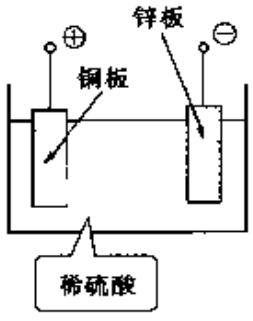
1790 年，伽伐尼根据解剖青蛙实验提出了“动物电”，以此为开端，伏打发现了两种金属接触就有电产生的规律，可以说这就是电池的起源。

1799 年发明伏打电池 伏打

1799 年，伏打在铜和锌之间夹入一层浸透盐水的纸，再把它们一层一层地叠起来，制成了“伏打电堆”。“电堆”的意思是指把许多单个电池单元高高地堆在一起。



伏打电堆



伏打电池

**(1) 一次电池**

一次放完电后不能再用的电池称为一次电池。伏打对伏打电堆做了改进，制成了伏打电池。

1836 年开发出丹尼尔电池 丹尼尔

1836 年，英国人丹尼尔在陶瓷桶里放入阳极和氧化剂，制成了丹尼尔电池。与伏打电池相比，丹尼尔电池能长时间提供电流。


丹尼尔电池

1868 年，法国的勒克朗谢公布了勒克朗谢电池，1885 年（明治 18 年）日本的尾井先藏发明了尾井干电池。尾井干电池是一种把电解液吸附在海绵里的特殊电池，具有搬运方便的特点。

1917 年，法国的费里发明了空气电池，1940 年，美国的鲁宾发明了水银电池。

**(2) 二次电池**

放完电还可以充电再用的电池称为二次电池。1859

1859 年
发明二次电池
普朗泰

年，法国的普朗泰发明了能够反复充电使用的铅蓄电池，其结构是稀硫酸中装有铅电极，这是最早的二次电池。现在，汽车里使用的就是这种类型的电池。

1897 年（明治 30 年），日本的岛津源藏开发出了具有 10A · h 容量的铅蓄电池，并把他本人名字 Genzo Simazu 的字头 GS 作为商品名称，取名为 GS 电池投放市场。

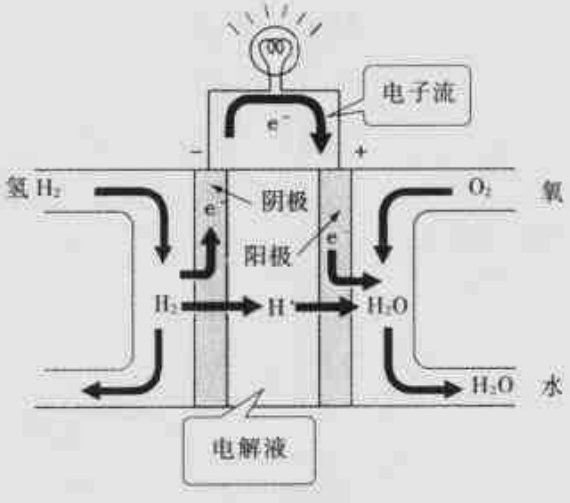
1899 年，瑞典的容纳制成了容纳电池，1905 年爱迪生制成了爱迪生电池。这些电池的电解液都用的是氢氧化钾，后来就被称为碱性电池。

1948 年，美国的纽曼发明了镍镉电池。这是一种能充电的干电池，是具有划时代意义的电池。

**(3) 燃料电池**

1939 年
发明燃料电池
格罗夫

1939 年，英国人格罗夫发现氧和氢的反应中有电能产生，并由实验证明了燃料电池的可能性。也就是说，电解水的时候消耗了电能而生成了氧和氢，反过来，从外部给阳极一侧送入氧，给阴极一侧送入氢，就能够产生电能和水。



燃料电池的构造

格罗夫当时只是做了实验，并未实用化。1958 年，剑桥大学（英国）制成了 5kW 的燃料电池。

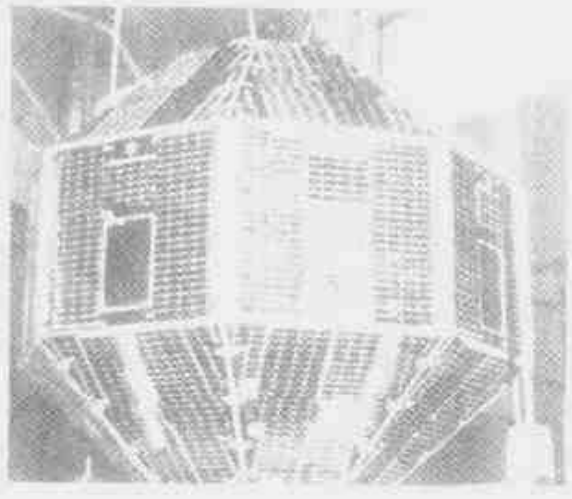
1965 年，美国 GE 公司成功地开发出了燃料电池，这个电池就安装在 1965 年的载人宇宙飞船双子星 5 号上，用于供给宇航员饮用水和飞船电能。1969 年登上月球的阿波罗 11 号飞船上的电源也使用了燃料电池作为飞船内电源。

1954 年发明太阳能电池夏品

### (4) 太阳能电池

1873 年，德国人西门子发明了用硒和铂丝制成的光电池。现在照相机曝光表中所用的就是这种硒光电池。

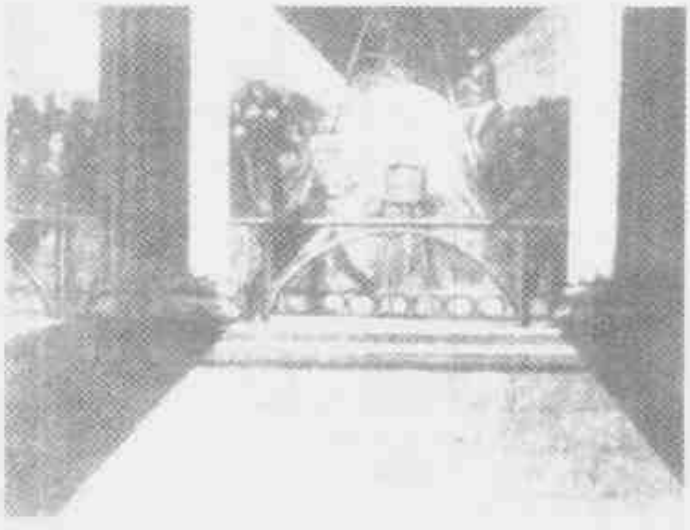
1954 年，美国的夏品发明了硅太阳能电池，这是一种当太阳光或灯光照到其 PN 结上时能产生电能的元件，广泛用于人造卫星、太阳能汽车、钟表、台式计算器等。提高这种元件转换效率的研究与开发工作仍在进行中。



人造卫星上的太阳能电池

## 6 照明的历史

18 世纪 60 年代由英国兴起的产业革命使工厂进入了连续加工、批量生产的时代，夜间照明成了重要问题。



伦敦的照明灯(1848 年)

1815 年发明电弧灯戴维

前面已经讲过，英国人戴维 1815 年曾做过用 2000 个伏打电池产生电弧的有名实验。



施普伦格尔真空泵

### (1) 白炽灯泡

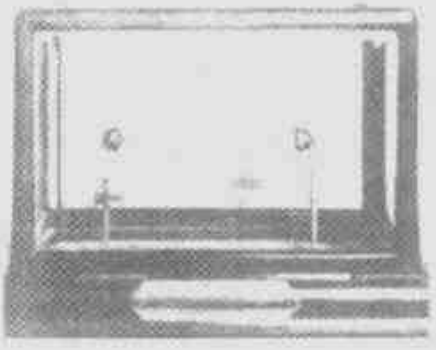
1860 年，英国人斯旺把棉线碳化后做成灯丝装入玻璃泡里，发明了碳丝灯泡。

然而，由于当时的真空技术不高，点灯时间不能过长，时间一长，灯丝就会在灯泡里氧化而烧掉。

斯旺所想到的白炽灯泡的原理是现在的白炽灯的起源。随着灯丝研究和真空技术的进步，白炽灯最终达到了实用化。从这点来说，斯旺的发明是一项大发明。

1860 年
发明斯旺灯泡
斯旺

1865 年，施普伦格尔为研究真空现象而开发出水银真空泵。斯旺知道这件事后，就在 1878 年把玻壳内的真空度提高，又在灯丝上下了一番功夫。他先把棉线用硫酸处理，然后再碳化，最后，他公布了斯旺灯泡。斯旺的白炽灯泡曾在巴黎万国博览会上展出。


斯旺电灯

1879 年
发明白炽灯泡
爱迪生

1879 年，美国的爱迪生成功地把白炽灯泡的寿命延长到了 40 小时以上。1880 年，爱迪生发现竹子是做白炽灯灯丝的优良材料，就把日本、中国、印度的竹子收集起来反复进行实验。

爱迪生把部下穆尔派到日本，在京都的八幡寻找优质竹子，若干年后，用八幡竹子制造出了灯丝。为了制造这种竹灯丝的灯泡，1882 年他在伦敦和纽约成立了爱迪生电灯公司。

1886 年
东京电灯公司
成立

在日本，1886 年（明治 19 年）东京电灯公司成立，明治 22 年起，一般的家庭开始用上了白炽灯泡。



1910 年，美国的库利奇用钨丝做灯丝，发明了钨丝灯泡。

1913 年，美国的兰米尔在玻壳里充入气体以防止灯丝蒸发，发明了充气钨丝灯泡。

1925 年，日本的不破橘三发明了内壁磨砂灯泡。

1931 年，日本的三浦顺一发明了双螺旋钨丝灯泡。

正是由于上述的不断探索，今天我们才能享受有白炽灯照明的日常生活，想起来真是漫漫长路啊。

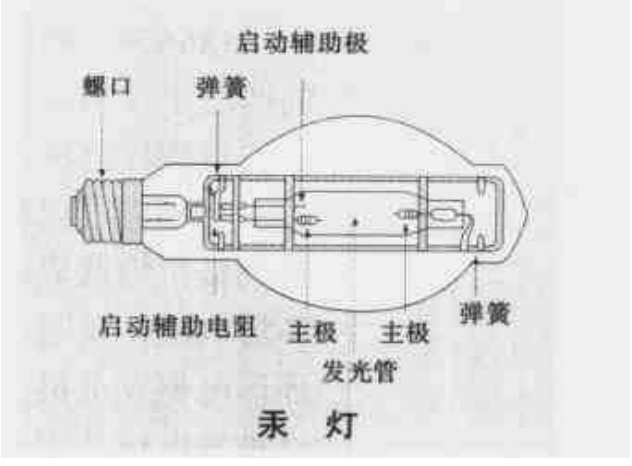


用竹子的碳化物做灯丝的爱迪生灯泡

**(2) 放电灯**

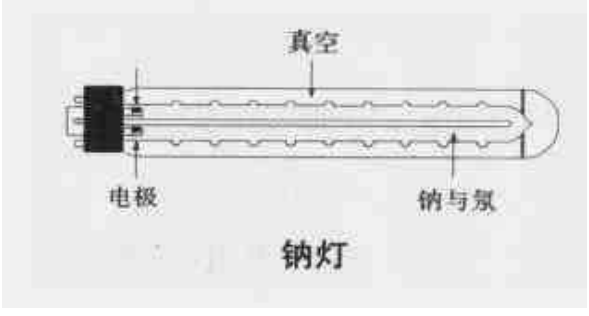
1902 年发明放电灯 休伊兹特

1902 年，美国的休伊兹特在玻壳内装入汞蒸气，发明了弧光放电汞灯。由于这种汞灯在汞蒸气的气压较低时发出的紫外线较多，所以常作为杀菌灯使用。而当汞气压较高时，可发出很强的可见光。




汞 灯

现在广泛用于广场照明和道路照明的高压汞灯所发出的光是一种混合光，混合光包括汞电弧放电的光和紫外线照到涂敷在玻壳内壁的荧光材料上所发出的光。

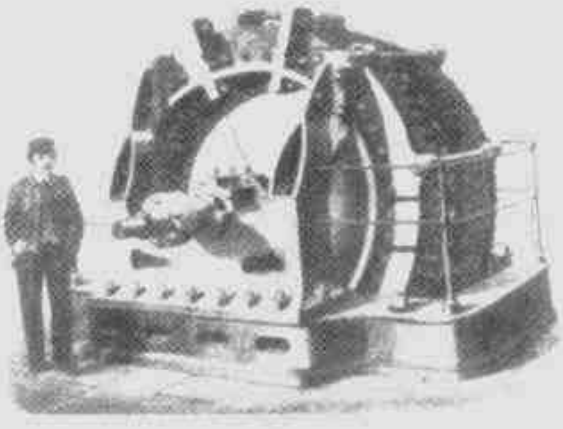



钠灯

1932 年，荷兰菲利浦公司开发出了波长为 590nm 单色光的钠灯，这种灯广泛用于公路的隧道照明。

1938 年，美国的英曼发明了现在广泛使用的荧光灯。这种灯通过用水银

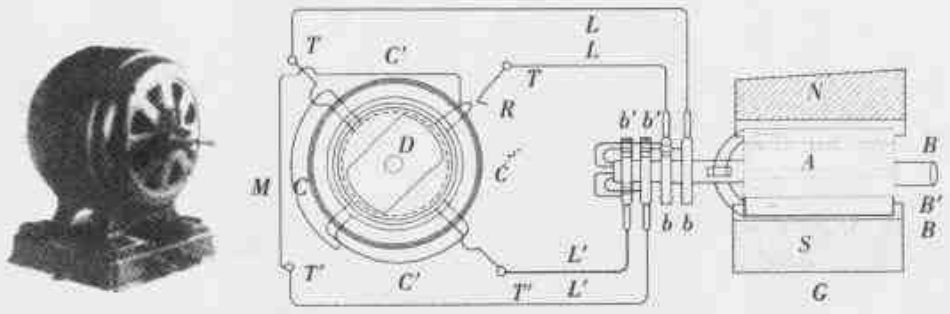
# 7 电力设备的历史



两相式戈登巨型发电机

布法罗市。

1889 年，西屋公司在俄勒冈州建设了发电厂，1892 年成功地将 15 000 伏电压送到了皮茨菲尔德。




特斯拉的两相发电机和电动机(左图是 1888 年的特斯拉感应电动机)



西屋公司的感应电动机(1897 年)

**(2) 电动机**

1834 年，俄罗斯的雅可比试制出了由电磁铁构成的直流电动机。1838 年，这种电动机曾开动了一艘船，电动机电源用了 320 个电池。此外，美国的达文波特和英国的戴比德逊也造出了直流电动机(1836 年)，用作印刷机的动力设备。由于这些电动机都以电池作为电源，所以都未能广泛普及。

1887 年，前面所讲过的特斯拉两相电动机作为实用化感应电动机的发展计划开始启动。

1834 年发明电动机 雅可比

1897 年，西屋公司制成了感应电动机，设立专业公司致力于电动机的普及。

**(3) 变压器**

发电端在向外输送交流电的时候，要先把交流电压升高，到了用电端，又得把送来的交流电压降低。因此，变压器是必不可少的。

1831 年，法拉第发现磁可以感应生成电，这就是变压器诞生的基础。

1882 年，英国的吉布斯获得了“照明与动力用配电方

1882 年
发明变压器
吉布斯

式”专利. 其内容就是将变压器用于配电，当时所用的变压器是磁路开放式变压器。



格拉尔和吉布斯的变压器(1883 年)

西屋引进了吉布斯的变压器，经过研究，于 1885 年开发出了实用的变压器。

此外，在此前一年的 1884 年，英国的霍普金森制成了闭合磁路式变压器。

**(4) 电力设备和三相交流技术**

两相交流电是用四根电线输电的技术。德国的多勃罗沃尔斯基在绕组上想出了窍门，从绕组上每隔 120°的三个地方引出抽头，得到了三相交流电。1889 年，利用这种三相交流电的旋转磁场，制成了功率为 100W 的最早的三相交流电动机。

1891 年
三相交流输电
开始
多勃罗沃尔斯基

同年，多勃罗沃尔斯基又开发出了三相四线制交流接线方式，并在 1891 年的法兰克福输电实验（150VA 三相变压器）中获得了圆满成功。



多里奥·多勃罗沃尔斯基

## 8 电子电路元器件的历史

当代，是包括计算机在内的电子学繁荣昌盛的时代，其背景与电子电路元器件由电子管→晶体管→集成电路的不断发展有着密切关系。

### (1) 电子管



弗莱明的二极管

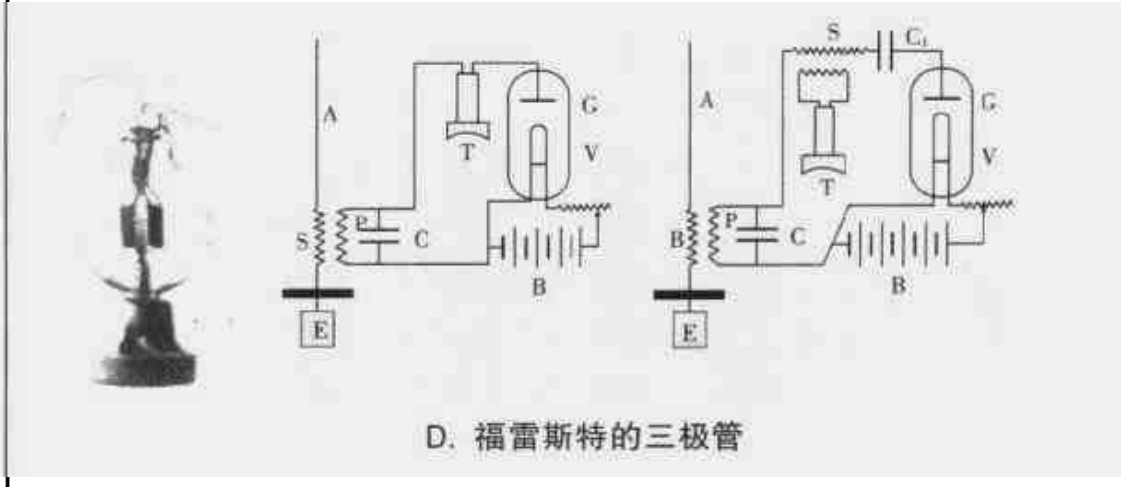
电子管是沿着二极管→三极管→四极管→五极管的顺序发明出来的。

1904 年
发明二极管
弗莱明

二极管：前面曾经讲过，爱迪生发现了电灯泡灯丝发射电子的“爱迪生效应”。1904 年，英国人弗莱明受到“爱迪生效应”的启发，发明了二极管。

1907 年
发明三极管
福雷斯特

三极管：1907 年，美国的福雷斯特发明了三极管。当时，真空技术尚不成熟，三极管的制造水平也不高。但在反复改进的过程中，人们懂得了三极管具有放大作用，终于拉开了**电子**学的帷幕。




D. 福雷斯特的三极管

振荡器也从上面所讲过的马可尼火花装置发展为三极管振荡器。三极管有三个电极，阳极、阴极和设置在二者之间的控制栅极，这个控制栅极是用来控制阴极所发射的**电子**流的。

1915 年
发明四极管
朗德

四极管：1915 年，英国的朗德在三极管的控制栅极与阳极之间又加了一个电极，称为帘栅极，其作用是解决三极管中流向阳极的电子流中有一部分会流到控制栅极上去的问题。

1917 年
发明五极管
约布斯特

五极管：1927 年，德国的约布斯特在阳极与帘栅极之间又加了一个电极，发明了五极管。新加的电极称为抑制栅。

加入这个电极的原因是：在四极管中，电子流撞到阳极上时阳极会产生二次电子发射，抑制栅就是为抑制这种二次电子发射而设置的。

此外，1934 年美国的汤姆森通过对电子管进行小型化改进，发明了适用于超短波的橡实管。

管壳不用玻璃而采用金属的 ST 管发明于 1937 年，经小型化后的 MT 管发明于 1939 年。

**(2) 晶体管**

1948 年发明晶体管 肖克莱、巴丁、布拉特

半导体器件大致分为晶体管和集成电路（IC）两大部分。第二次世界大战后，由于半导体技术的进步，电子学得到了令人瞩目的发展。



硅功率晶体管

晶体管是美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁、布拉特在 1948 年发明的。

这种晶体管的结构是使两根金属丝与低掺杂锗半导体表面接触，称为点接触型晶体管。

1949 年，开发出了结型晶体管，在实用化方而前进了一大步。

1956 年开发出了制造 p 型和 n 型半导体的扩散法，它是在高温下将杂质原子渗透到半导体表层的一种方法。1960 年开发出了外延生长法并制成了外延平面型晶体管。外延生长法是把硅晶体放在氢气和卤化物气体中来制造半导体的一种方法。

有了半导体技术的这些发展，随之就诞生了集成电路。

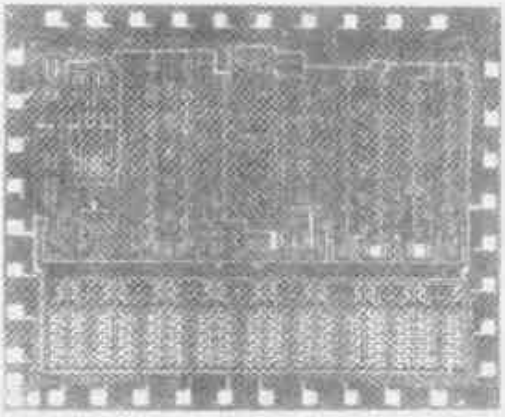
**(3) 集成电路**

大约在 1956 年，英国的达马就从晶体管原理预想到了集成电路的出现。

1958 年美国提出了用半导体制造全部电路元器件，实现集成电路化的方案。

1961 年
发明集成电路
得克萨斯仪器
公司

1961 年，得克萨斯仪器公司开始批量生产集成电路。



高密度集成电路

集成电路并不是用一个一个的电路元器件连接成的电路，而是把具有某种功能的电路“埋”在半导体晶体里的一个器件。它易于小型化和减少引线端，所以具有可靠性高的优点。

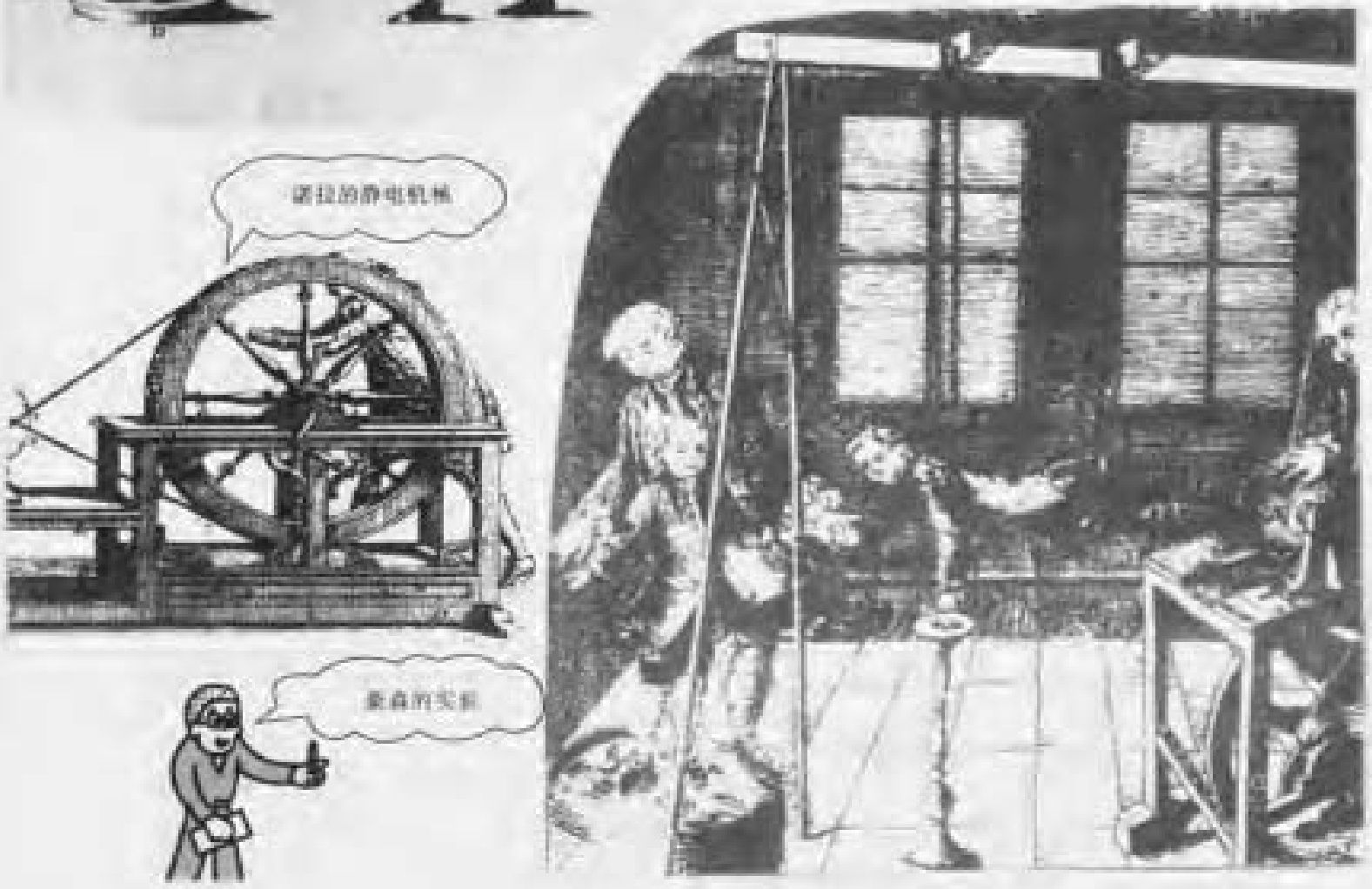
集成电路的集成度在逐年增加。元件数在 100 个以下的小规模集成电路、100～1000 个的中规模集成电路、1000～100000 个的大规模集成电路，以及 100000 个以上的超大规模集成电路，都已依次开发出来，并在各种装置中获得了广泛应用。

# 1 电学基础



## 图解早期的电气技术





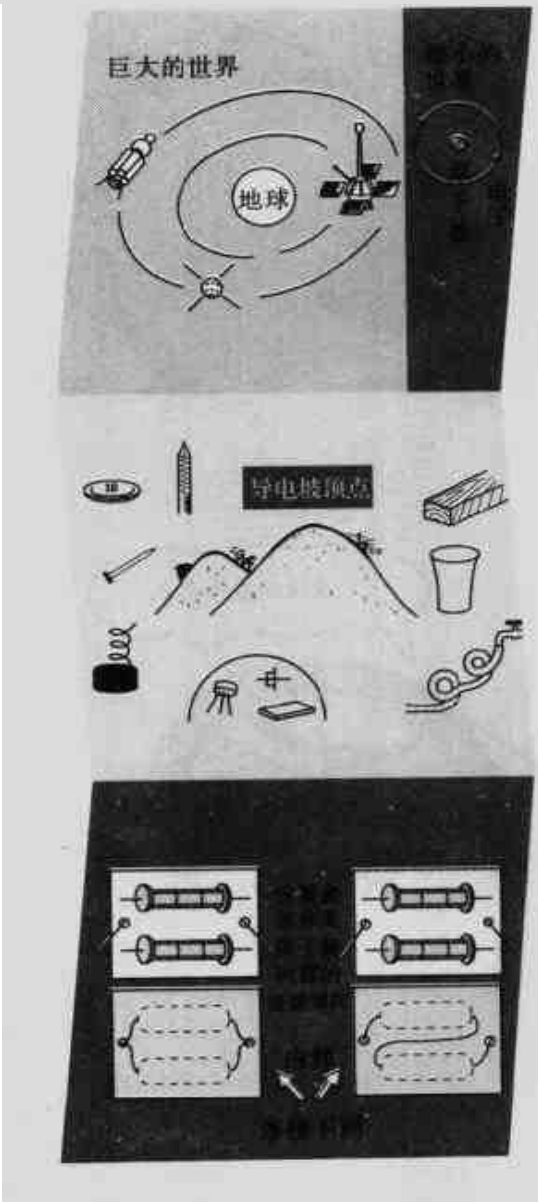
# 本章要点及学习方法

我们可以如此方便地利用电，而且幸运地生活在能够学习电学知识的时代。由于科技工作者的努力，电气技术接连不断地带来了新的发现、发明和新的应用。

对于电学现象和理论，由于研究的是肉眼看不到的电子的行为，所以有点摸不着头脑，但如果能做到从基础的事项开始，一步一步正确地去理解，就会真正轻松地学下去。而且，最好采取将学到的东西与实际的应用结合起来，采用边学边用的学习方法。

一说到电，就想到电流，但其真正的主角是什么，在开始学习的时候，应抓住重点，弄清楚基础知识。

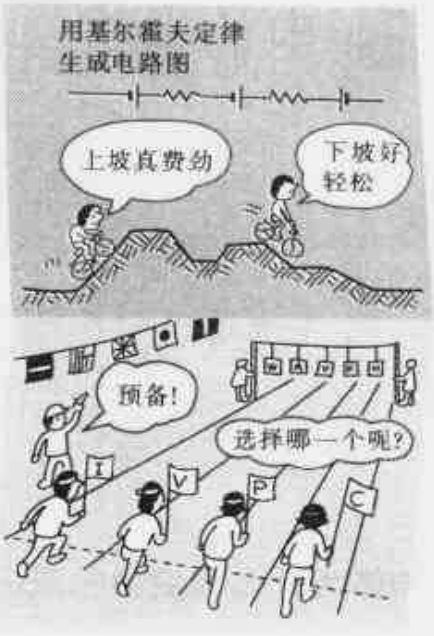
接下来，学习电路，就如同在任何场合，都要把各种要素组合起来才能发挥很大作用那样，对于电，也要研究电的这些要素，而且要研究在各要素间起作用的基本定律。



另外从电路这方面来看，要学习改变、阻止电的流动的开关以及限制电的流动的电阻，要了解它们的连接方式，以及不同连接方式具有的不同功能，还要学习求解电流的各种公式。

如果抓住了这些基础的内容，困难会少一些，但还要学习作为解释电路构成的工具的基尔霍夫定律以及电桥电路的知识。

这样，本章从弄清楚电的本质开始，以掌握电路的总体面貌为中心，由此阐明基本的电学定律。最后研究电的单位和图形符号。




## 本章要学习的内容

电是什么？对于已掌握基本电学常识的人，这部分内容可以作为“巩固基础”的复习。

从直流开始介绍电学基础。在这一部分将阐述“整流”。

这里还将介绍单位和图形符号！




将三根箭分别折断，很容易做到，将三根箭捆在一起其强度就增强了，这说明将力合在一起的重要性。

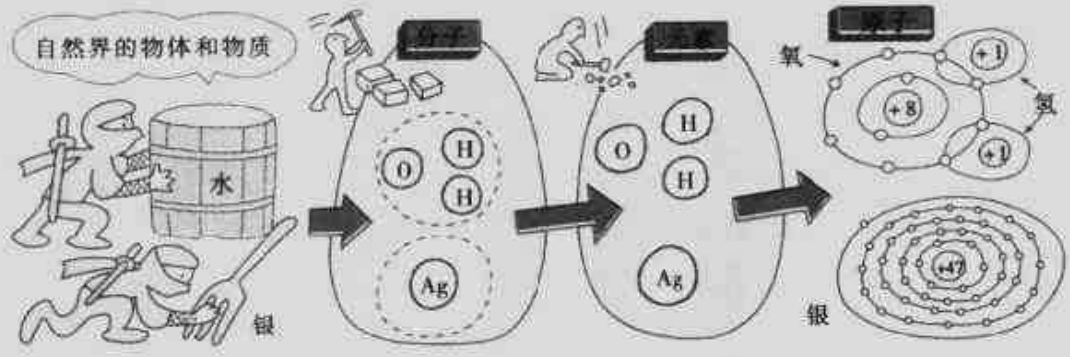
将电路的各种要素集中起来会产生什么样的力？

电阻的作用将在第2章中学习。这里仅介绍电路中的电阻对电流流动的影响。

如果知道基本的定律，就可以轻松地学习复杂的电路。这里将研究定律所起的作用。



# 1 电的本质




**物体为什么被变为⊕或⊖**

把自然界中存在的物质用科学的方法细分下去，细分到使其失去作为该物质的性质的地步。这时的物质称为**元素**。

例如，即使把一粒食盐晶粒变小，在保持食盐性质的条件下，无论怎样小也是食盐的分子。如果再将它细分，就变成钠(Na )和氯(Cl)这样小的粒子。这已经不是食盐，但被分开的 Na 和 Cl 具有相似的性质，把这样的东西称为**原子**。原子(atom)在希腊语中具有“不能分开(indivisible)”的意思。

将原子的构造比喻成太阳系，则原子是由位于中心的相当于太阳的**原子核**和相当于在太阳周围公转的行星的**电子**组成。原子核则是由**质子**和**中子**组成的。

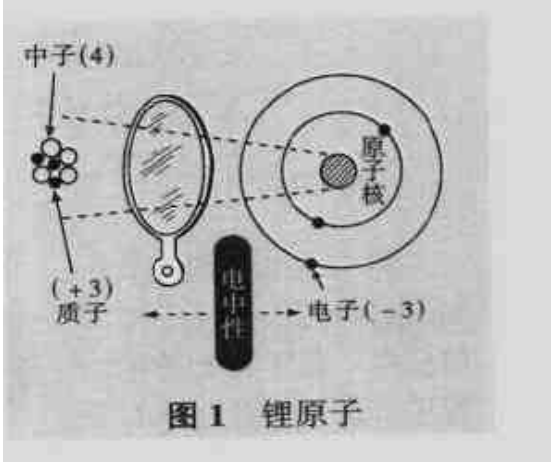
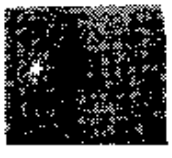


图 1　锂原子

从电的性质来看，电子带负电，质子带正电。平时原子正、负电量的大小保持平衡，呈电中性(图 1)。

但是当受到来自外力的作用时，例如接收了热、摩擦或其他电子的冲撞等带来的能量时，与原子核结合较弱的电子(称为**最外层电子**)就会脱离轨道。其结果是，原子将丧失负电，因此在电性质上将变正。并且，有的原子获得负电，因此，原子将变负。

这样平常在电性质上是中性的原子或者变正，或者变负。



## 带负电的电子

图 2 示出了使物体带电的实验。

首先用毛皮擦硬橡胶棒给与能量。毛皮的电子跑出去，硬橡胶棒带负电(负电剩余)。毛皮失去电子，带正电。

为了研究电的发生，就有了图 3 所示的**金属箔验电器**。在玻璃容器中垂放着两张薄金属箔。该金属箔位于玻璃容器中，所以不会因受风或空气的作用而摆动。

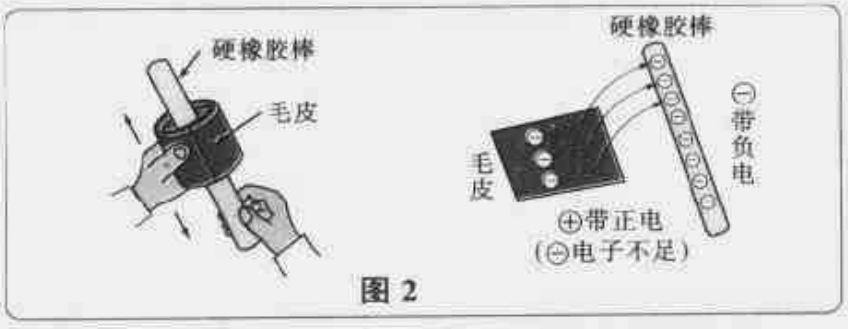


图 2

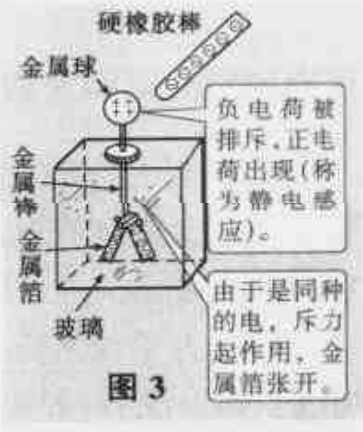


图 3

【实验】 将带负电的硬橡胶棒如图 3 那样靠近金属球时，下部的金属箔张开；远离时金属箔闭合。这清楚地表明电子的存在，由于硬橡胶棒所带的负电，它靠近金属球时使金属球内的负电荷远离，被移到金属箔上边，在两张箔片上积蓄了同种电荷，斥力起作用，箔张开。

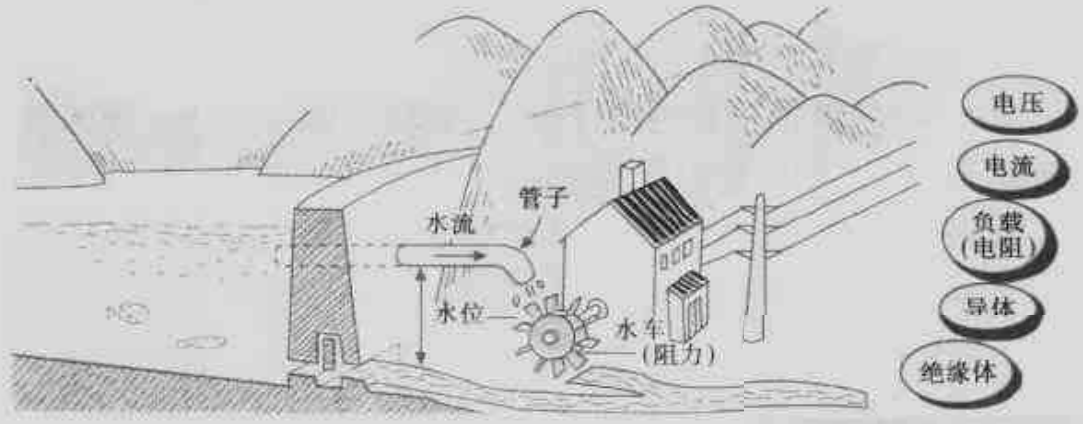
### 摩擦生电

用摩擦的方法会产生什么样的电荷呢？即使是同一种材料，因与其摩擦的对象不同，带电种类也不同。按下图所示的顺序两种物体摩擦时，右侧的物体带负电。你可用身边的材料作试验。

(+)毛皮 — 玻璃 — 云母 — 丝绸 — 琥珀 — 塑料 — 硬橡胶(-)



# 2 电的要素




## 使电流动的源和流动的通道

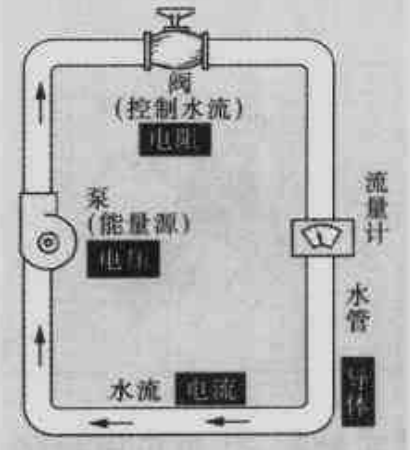



图 1　电的流动过程

可把电的流动比作水的流动。其本质的确非常相似，因此在这里按照这种想法探索一下它们的关系。

❶ 为了使水流动，需要什么？需要自然的坡度。如果没有，要用人工的办法形成落差。这就是上面插图中的大坝，以及图 1 中的泵。

在电学中把这种落差称为**电压**。

❷ 在电学中把相当于水流的东西称为**电流**。电流在金属体和大地等处均可流动。

❸ 如同有不浪费水流的水管那样，在电学中也有被用于电流流动的“通道”，把这种通道称为**导体**。若导体是裸露的，则当它与其他的导体接触时，电流会脱离原来的通道流到别处。为了防止这种情况发生，把包围导体以防止电流流到别处的东西称为**绝缘体**。

❶ 在图 1 中，在水流的中途装上了阀，它是为了控制水的流动，改变水的流量。与它起同样作用的东西在电学中称为**电阻**。

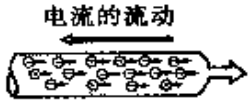
One point

所谓 1[A](安培)电流，是指 1 秒内移动 1[C](库仑)电荷

1[C] ≈ 6 240 000 000 000 000 000 个电子

= $6.24 \times 10^{18}$ 个电子

$I = \frac{Q}{t}$




注意，电流的流动和电子的流动方向相反



## 电子的流动——电流

水流以每秒流动多少立方米水来测量，电流也以每秒移动多少电荷来度量。

现说明电流即电荷的移动是怎样形成的，图 2 中示出了带正电的 A 球和带负电的 B 球。在这两个球之间用铜线或其它导体连接时，多余的电子通过导体从 B 移动到 A，当两个球中电子的数量相等时电子的移动就停止了。这时两个球中电子的数量差当然就消除了。把电子的这种移动称为**电流**。

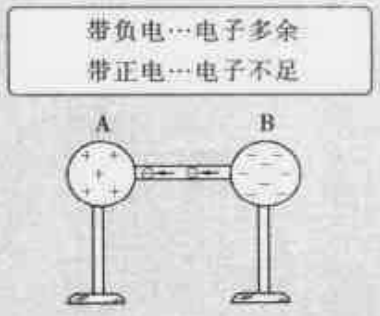


图 2　电流

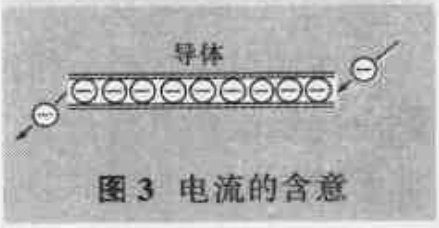


图 3　电流的含意

这样就知道了电这样的“隐形者”的“真身”是电子。而实际上电流的流动就是电子的流动，规定电子流动的反方向为电流的方向。所谓来自别处的电子穿过导体中挤满的电子而移动，就是说要像图 3 那样提供将导体中电子⊖推出去的力，并重复这个动作。使电子产生这样移动的力称为**电动势**或**电压**。

因此用铜线等将电池之类的电动势与灯泡这样的负载连接时，就有电子流动，它从电源的负端通过灯泡向电源的正端行进，从而形成了电流。这种情况请在下面的“let'stry”中具体地加以验证。在这种情况下，电流通常也按电源的正端→灯泡→电源的负端的方向流动。

Let's try

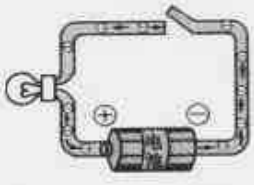
### 分解手电筒

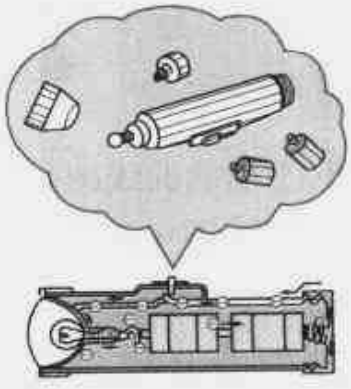
电灯泡发亮时，就是电子从电池流出。追寻电子的运动时，就形成一个通道。

即，

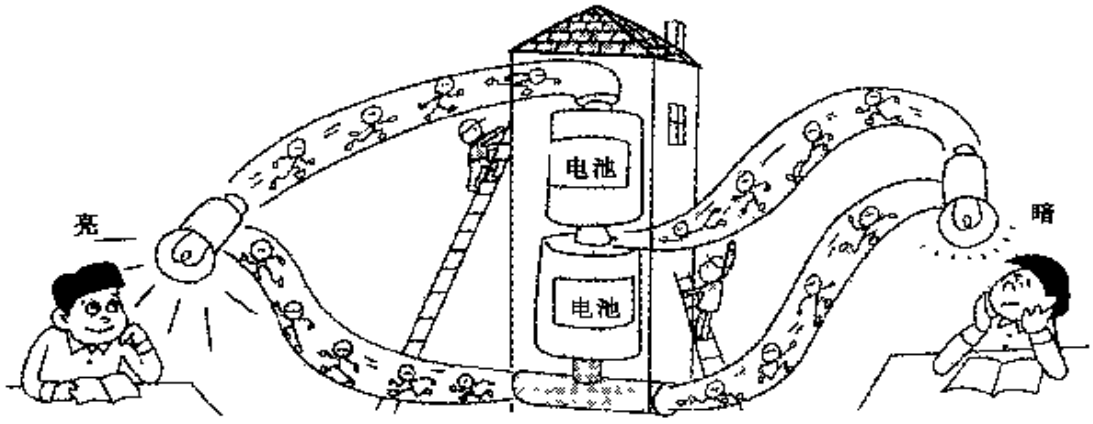
电池负极⊖ → 开关 → 灯泡 → 电池正极⊕

（电流的方向与此相反）





# 3 欧姆定律




## 电流与电压成正比

在题图中有两个回路(电流流动的通道,将在4中详细地介绍)。即左半部分用两个电池作为电源连接灯泡,右半部分是一个电池连接灯泡的情况。

这样连接左半部分灯泡当然会更亮。

将这种情况与水槽中的水和水的流动情况对照,这就是图 1。这时,图中标注水位差的部分相当于题图中的电池。图中示出,水位差大的水的流动也快。

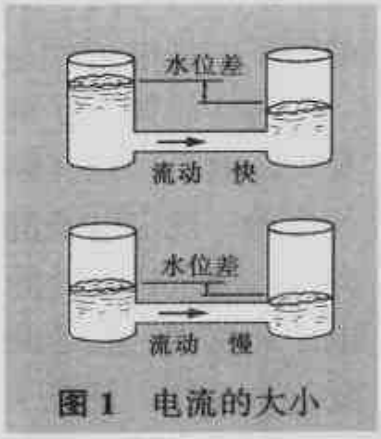


图 1 电流的大小

下面,对电路中的元件认真地作一些分析。电路图如图 2 所示。



图 2 电路图

按下述过程作实验:

❶ 电阻 $R$ 不变,改变电压。

❷ 电压 $V$ 不变,改变电阻。

图 3 示出该实验结果的曲线图,上面的曲线图是❶的情况。此图将时间作为横坐标轴,图中实线示出了电压的变化,同处的虚线(- - -)示出了电流随时间的变化。该图显示出两条曲线重叠在一起,由此可知**电流与电压成正比**。图 3 下面的曲线是❷的情况。

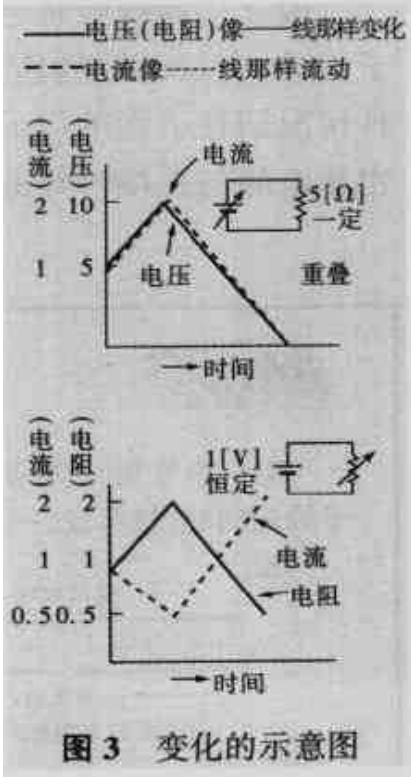


图 3 变化的示意图



## 欧姆预测的电学定律

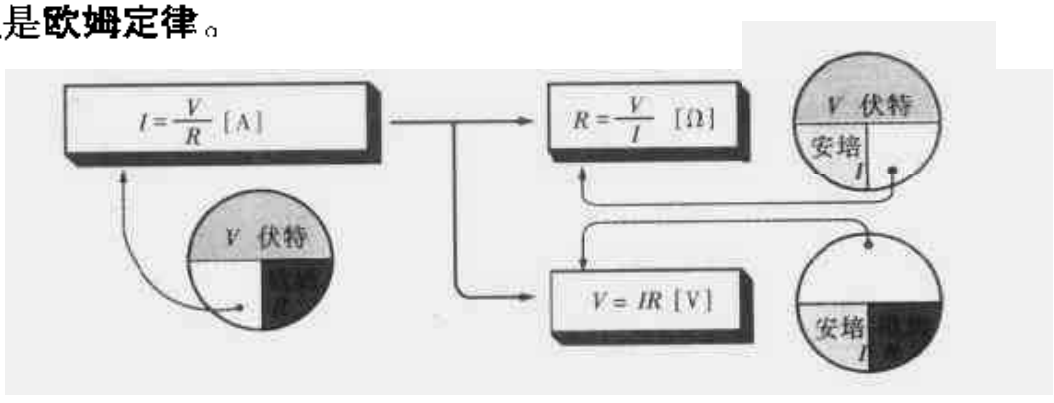
G. S. 欧姆（德国，1789～1854）于1827年发表《电路的数学研究》，发现了欧姆定律。

从前述的实验可以得出如下结论：

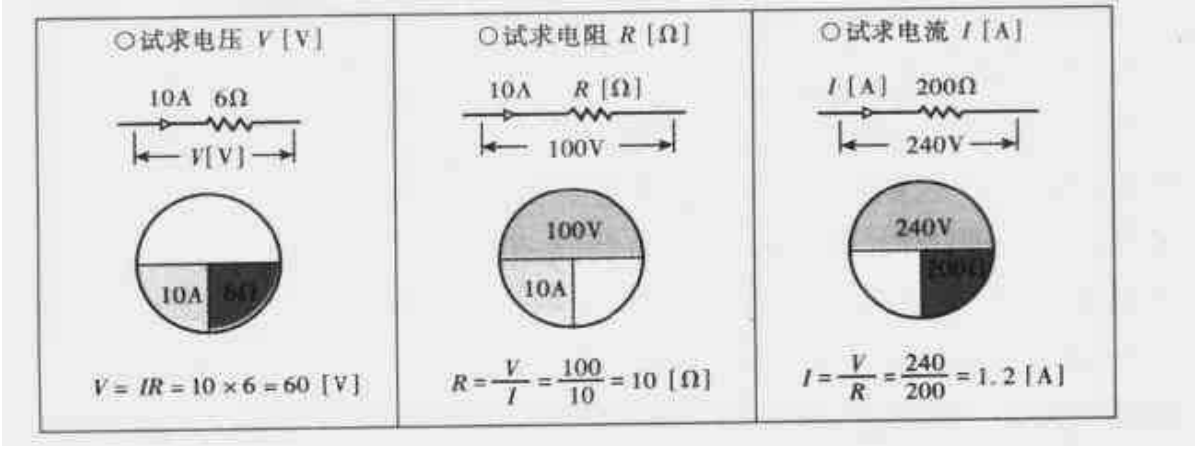
❶ 电流与电压成正比。

❷ 电流与电阻成反比。

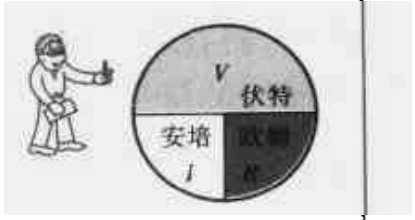
这里设电流为 $I$[A]，电压为 $V$[V]，电阻为 $R$[Ω]，则上述关系表示如下，这就是**欧姆定律**。




**【例题练习】** 欧姆定律是解释电路的基本定律。通过几个例题，你可以准确地掌握欧姆定律的用法。




### $V-I-R$ 和 G. S. 欧姆




❶ 伏特（电路中推动电流流动的电压）

❶ 安培（电路中流动的电流的大小）

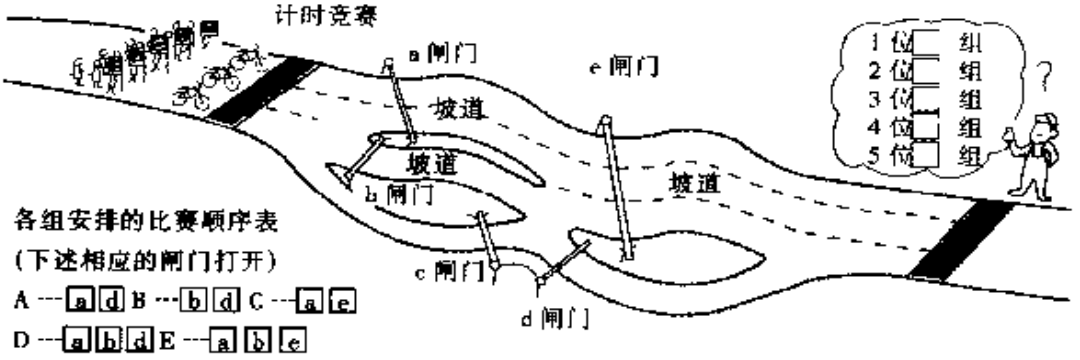
❸ 欧姆（电路中的元件的电阻的大小）

G. S. 欧姆发现这些量之间有如下的关系（参看右图）：

$$V\,[\mathrm{V}]=I\,[\mathrm{A}]\times R\,[\Omega]$$

$V$：电压符号
$I$：电流符号
$R$：电阻符号

# 4 电　　路

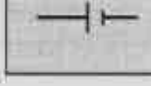
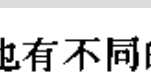
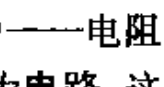
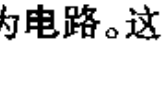



## 道路和电路的相似与不同

驾车在道路上行驶时，因为道路宽阔通畅，所以车可以开得飞快。与此相同，电也有电流流动的通路，这是重要的。但是电通常有使电流流动的原动力(电压)，其通路从有原动力的装置开始，又返回到那里。即形成**回路**(闭路)，这是必需的。

其次，道路混乱时，用△△形交通标志物封闭某些路段，形成限制适当车辆进入的闸门。这在电学中相当于**开关**。并且像在道路上有宽的地方、窄的地方那样，在电学中将其称为**电阻**，道路的宽、窄相当于电阻的大小。电路与道路既有相似的地方也有不同的地方，但在电学中，电源(使电流流动的原动力)——导体(接线)——电阻(各种电器)——开关这些元素被组合起来，并且形成回路，称其为**电路**。这里设想把题图的计时竞赛换成电路。(也许能吧！)

表 1　电气图符号的例子

| | |
|---|---|
|  | 电阻或<br>电阻器 |
|  | 单刀单<br>掷开关 |
|  | 单刀双<br>掷开关 |
|  | 电　池 |

为了具体地、而且有效地表示电路，使用电气图形符号。关于这些图形符号，将在1.1中说明，读者也可直接阅读1.2中的有关内容。表 1 仅列出在本节使用的符号。

## 电路图的活用

题图中把出发点和目的地比作电池的⊕，⊖极，把闸门比作开关，设 3 号车线坡道电阻为 0.3Ω，2 号车线坡道电阻为 2Ω，1 号车线坡道电阻为



3Ω。并且闸门 c，d 是联锁（interlock）的闸门，一个闸门打开时，另一个闸门关闭，它作为单刀双掷开关使用。闸门的打开在开关中看作“接通”。

这样，根据开关的接通方法，可以把各组车通过的路线用电路替换。图 1 是基于这种考虑，并根据下面的假定而组成的电路。

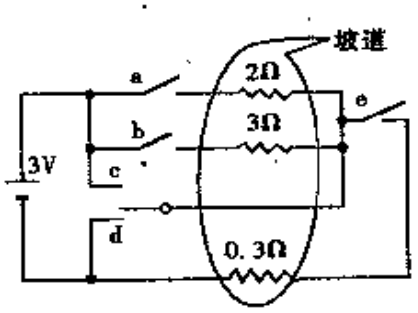



**图 1　与车的竞赛同样的电路**

- 早到达就意味着流过的电流多（即车的流动通畅）。
- 在组成的电路中，用欧姆定律计算电流量的大小。

在这样的条件下计算每种情况下的电流量则如表 2。试与最初的题图中自己决定的顺序比较一下。

**One point**

作为逻辑电路或计算机的基本电路有“与”电路及“或”电路。前者为仅当两个输入端都有输入时才有输出，后者为只要有一个输入端有输入时即有输出。

**Let's try**

用线的连接表示由开关实现的闭合回路（粗线表示开关 a、d 接通时的情形）。

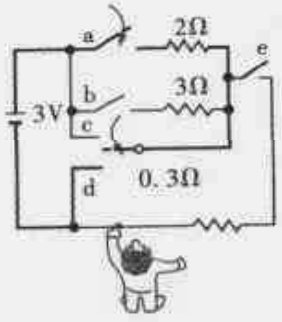
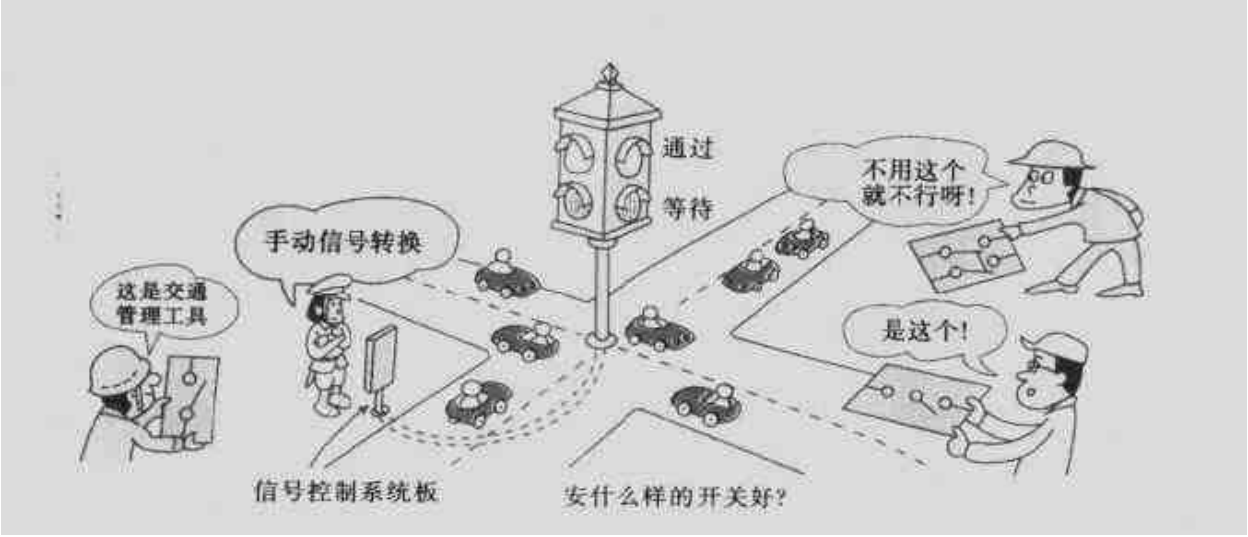



**表 2**

| 组 | 闸门打开（开关接通） | 条　件 | 判定顺序的资料（电流的计算） | 顺序 |
|---|---|---|---|---|
| A | a, d | $V=3$ [V]<br>$R=R_1=2$ [Ω] | $I=\frac{V}{R}=\frac{3}{2}=1.5$ [A] | 3 |
| B | b, d | $V=3$ [V]<br>$R=R_2=3$ [Ω] | $I=\frac{V}{R}=\frac{3}{3}=1$ [A] | 5 |
| C | a, e | $V=3$ [V]<br>$R=R_1+R_3$<br>$=2+0.3=2.3$<br>[Ω] | $I=\frac{V}{R}=\frac{3}{2.3}=1.3$ [A] | 4 |
| D | a, b, d | $V=3$ [V]<br>$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$<br>$=1.2$ [Ω] | $I=\frac{V}{R}=\frac{3}{1.2}=2.5$ [A] | 1 |
| E | a, b, e | $V=3$ [V]<br>$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+R_1$<br>$=1.2+0.3=1.5$ [Ω] | $I=\frac{V}{R}=\frac{3}{1.5}=2$ [A] | 2 |

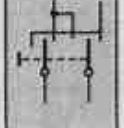
# 5 开关电路




## 开关的种类

可用开关控制电。在家中开启你房间的电灯时，你就**接通了电路**或使**电路闭合**。这样，开关闭合时，电子就流到灯泡中，由于使用开关，电气技术人员就能够自己思考电路的动作。不过，无论怎样认真地思考，开关也只有“接通”和“断开”两种状态。因而，深刻地理解开关的形式，就会灵活运用。在题图的例子中，为了交互转换信号，使用什么样的开关好呢（实际上还有提示“注意”（黄灯）的信号，电路就更加复杂了）？首先从开关的种类（基本的开关）着手分析（表 1）。

表 1

| 名称 | 简称 | 开关 | 图形符号 | 名称 | 简称 | 开关 | 图形符号 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 单刀单掷 | SPST |  |  | 双刀单掷 | DPST |  |  |
| 单刀双掷 | SPDT |  |  | 双刀双掷 | DPDT |  |  |

S…Single（单）　D…Double（双）　P…Pole（刀）　T…Throw（掷）

## 怎样交互转换信号灯

图 1 所示的是一种解答。因是 GO(通过) 和 Wait(等待) 两种信号灯轮流点亮，所以，用切换开关(SPDT 或 DPDT)接通。这里使用了 SPDT。

那么，下面再来解决使用开关的课题。

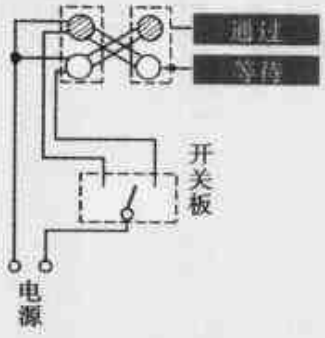
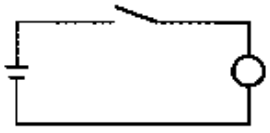
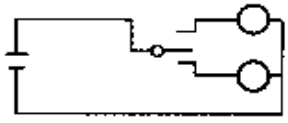



图 1　对问题的解释

❶ 用 SPST 开关使 1 盏灯开、闭的电路

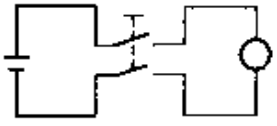


❷ 用 SPDT 开关使 2 盏灯轮流开、闭的电路

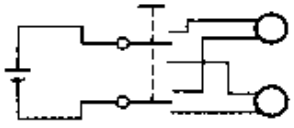




❸ 用 DPST 开关使 1 盏灯开、闭的电路



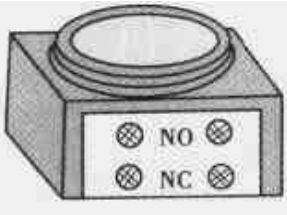
❹ 用 DPDT 开关使 2 盏灯轮流开、闭的电路



### 关于接点

必须把电路接通和断开的接点接到开关或继电器上。这里，以按钮开关为例，研究一下接点的名称和图形符号。

接点可分为 a 接点和 b 接点两类。a 接点的 a 取自德语的含有“工作”意思的 arbeit 的词头，b 接点的 b 取自英语的含有“断路”意思的 break 的词头。图形符号的 ⊤ 是表示按压操作的符号，--- 是表示联动的符号。记住按钮的动作和图形符号的关系。




(a) 按钮开关



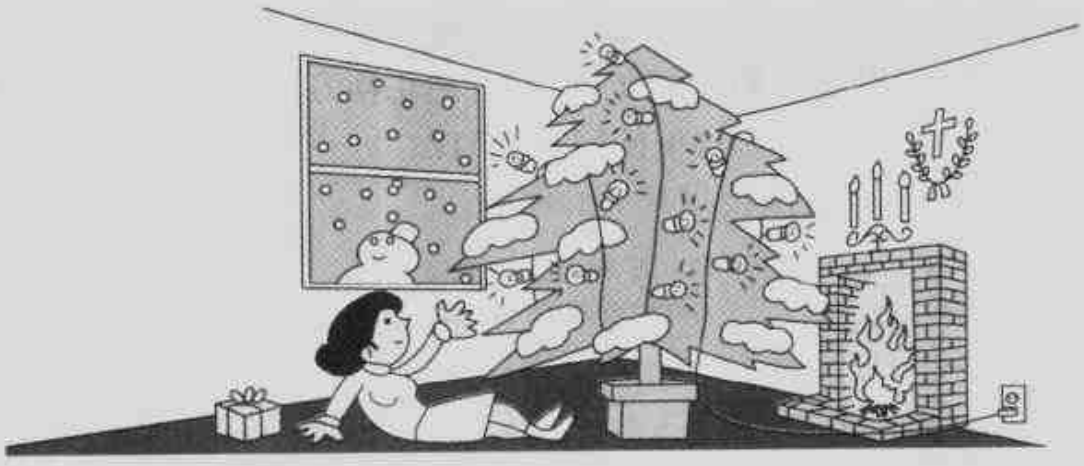

(b) 接点的动作

| | |
|---|---|
| a 接点 | NO: 常开 |
| b 接点 | NC: 常闭 |




(c)图形符号

# 6 电阻的串联与并联



梦幻般的“圣诞树”

一到岁末，在枞树的树枝上挂上发出各种各样颜色光的圣诞节灯泡，当它忽亮忽灭时，就营造出一种奇妙的气氛。灯泡的用法有连续地发光和使光忽亮忽灭两种。被挂在圣诞树上的灯泡的用法属于后者。把灯泡一个接一个地**串联**连接，在其中的一个灯泡内装有使用双金属片（使热膨胀系数高的金属和热膨胀系数低的金属粘在一起成为一块金属板）的自动开关，当双金属片脱开时，灯泡就全部熄灭。双金属片因灯丝发热而变形使开关断开，冷却时则复原，使开关重又接通。圣诞树的电灯泡则因此一会儿点亮、一会儿熄灭（图1）。好好地想一想，这里灯泡的连接方法和家庭中的有什么不同。家庭中的灯泡是像图2那样**并联**，因此，即使取下一个灯泡，其他灯泡仍连通着。圣诞树的灯泡不是这样连接，即使没有双金属片不动作，只要取下一个灯泡，

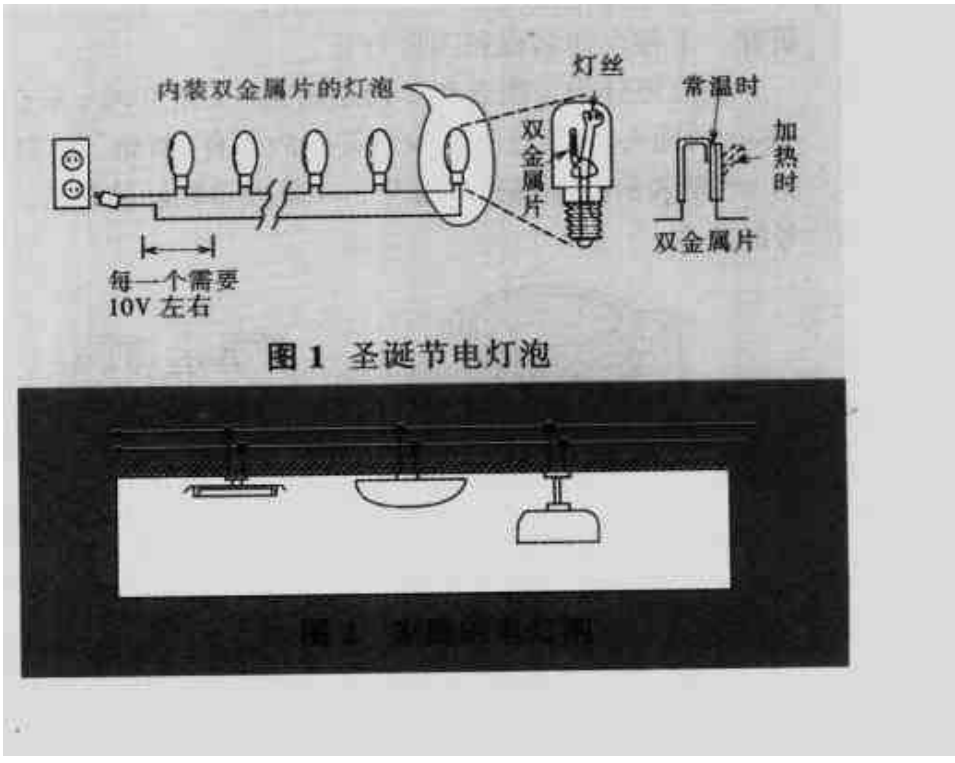



图1 圣诞节电灯泡



全部灯泡就都熄灭。

### 串联电路、并联电路的计算方法

无论是用电热器还是用电阻，有时是单独使用，但许多情况下是将几个连续起来使用。要掌握这种情况下的计算方法。

**【串联电路】**

在图 3 中，为了求流过串联电阻的电流，必须知道总电阻值。串联时，只要把各电阻值**加起来**就可以得到总电阻值。

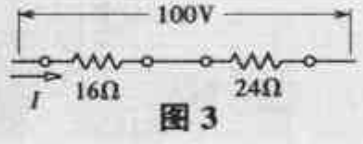


图 3

| | | |
|---|---|---|
| 总电阻 | $R = 16 + 24 = 40\ [\Omega]$ | （流向各电阻的电流相同） |
| 回路电流 | $I = V/R = 100/40 = 2.5\ [\mathrm{A}]$ | |

**【并联电路】**

在并联电路中，各电阻上都加**相同的电压**。把这种关系考虑进去，试求总电阻值（图 4）。

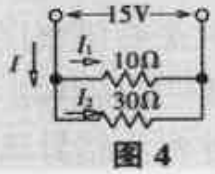


图 4

| | | |
|---|---|---|
| ❶ 求 $I_1$, $I_2$ | $I_1 = V/R = 15/10 = 1.5\ [\mathrm{A}]$ | |
| | $I_2 = V/R = 15/30 = 0.5\ [\mathrm{A}]$ | |
| ❷ 求总电流 $I$ | $I = I_1 + I_2 = 1.5 + 0.5 = 2.0\ [\mathrm{A}]$ | |
| ❸ 并联总电阻 | $R = V/I = 15/2.0 = 7.5\ [\Omega]$ | |

在这里，为了由所给的电阻直接得到最后要求出的总电阻，可用式 $R = \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 求得。即用两个电阻的“积/和”就可以。

本例的情况为 $R = \dfrac{10 \times 30}{10 + 30} = \dfrac{300}{40} = 7.5\ [\Omega]$，与上面所求的一样。



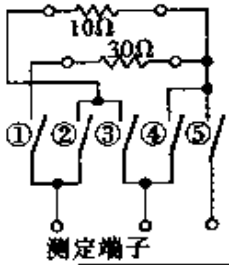
**Let's try** 考虑一下是串联还是并联？

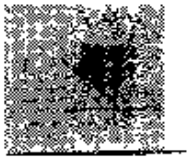
【准备】 两个电阻　4 个开关　欧姆表（万用表）

【实验】 按右图接线，按各种方式接通开关，预测这时的电阻值，同时用欧姆表测量加以确认。

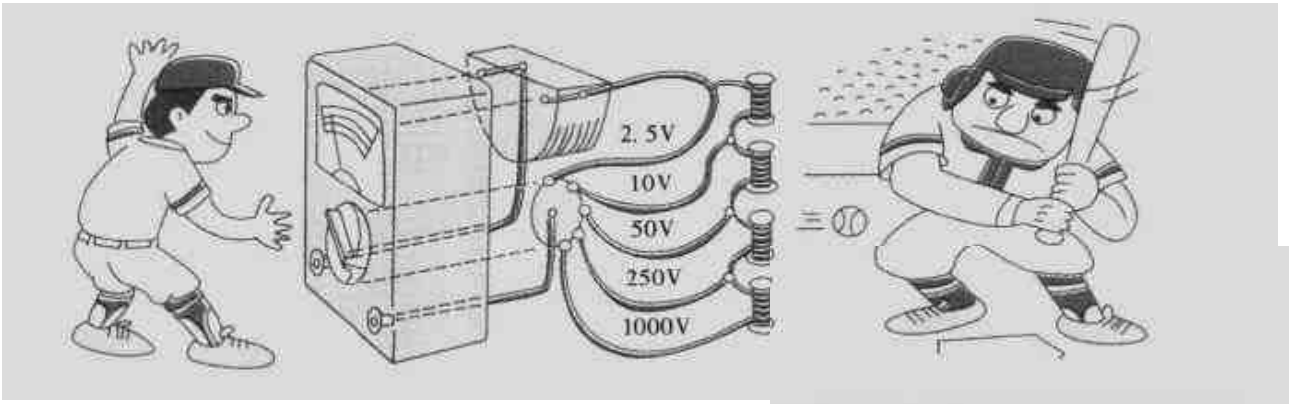
（开关接通方法的例子　①和③，①和④，②和④，①和②和④）

（测定值的结果　40[Ω]，30[Ω]，10[Ω]，7.5[Ω]）



# 7 倍率器的作用




起用"替补队员"击球

电压表的线圈中流过电流指针就偏转。因此在测量仪表中流过一定量的电流时，要规定指针是否满刻度地偏转。在图 1 中，当加上 0.1V 的电压时，就有 0.001A 的电流流过，设此时为指针满刻度偏转，根据欧姆定律，电压表本身具有的电阻为

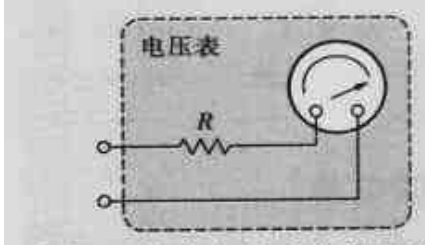



图 1　构成电压表的测量仪表



$$R=\frac{0.1}{0.001}=\frac{1\times10^{-1}}{1\times10^{-3}}=\frac{1}{1\times10^{-2}}=1\times10^{2}=100\ [\Omega]=0.1\ [\mathrm{k\Omega}]$$

如果使用这个仪表测量 10V 的电压，指针会"甩出"，测量仪表出现故障。这时怎么办呢？在这里"替补队员"出现了。把 0.1V 电压加到仪表上就可以了，如图 2 所示，给这个测量仪表串联一个电阻，这个电阻只要能分担 10－0.1＝9.9[V]电压即可。试求其电阻的大小。

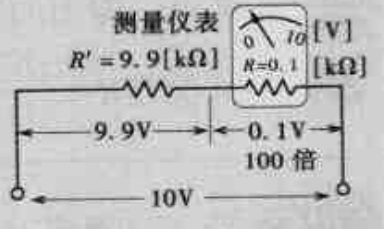
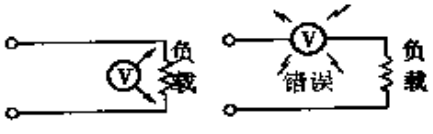



图 2　电路

$$R'=\frac{V}{I}=\frac{9.9}{0.001}=9.9\times10^{3}=9.9\ [\mathrm{k\Omega}]$$




电压表经常与电路并联(接在负载或元件)两端连接。决不能串联。






## “替补队员”的名字叫“倍率器”

如上所述，如果使用替补队员，用一个测量仪表就可以测量各种各样的电压。这样，量程为了起扩展量程的作用而与测量仪表具有的电阻（称为**内阻**）串联接入的电阻称为“**倍率器**”。

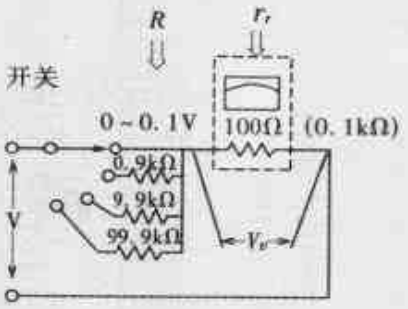



图 3　多量程电压表

如把几个倍率器纳入一个测量仪表中，用一个测量仪表就可以测定几种电压。这些倍率器可以用切换开关（普通型万用表）或取出几个端子（多量程电压表）加以选择。对于图 3 的情况，请考虑一下在每个端子最大能测量多少伏的电压（答案示于表 1）。

表 1　测定范围

| 倍率器 | 测定范围 |
|---|---|
| 0.9kΩ 时 | → 0～1[V] |
| 9.9kΩ 时 | → 0～10[V] |
| 99.9kΩ 时 | → 0～100[V] |

把能测量加在电压表上电压（$V_v$）的多少倍电压（$V$）称为**倍率**[1]。在图 3 中，设这个倍率为 $m$，并设电压表的内阻为 $r_v$，**倍率器的电阻为** $R$，则

$$m = \frac{V}{V_v} = \frac{R + r_v}{r_v} \rightarrow \begin{matrix} R + r_v = mr_v \\ R = (m-1)\,r_v \end{matrix}$$

要记住“（倍率 − 1）倍的电阻”！

One point

【例题】　为了用内阻 500Ω，5V 的电压表测量 200V 的电压，要加上多少[Ω]的倍率器才好？

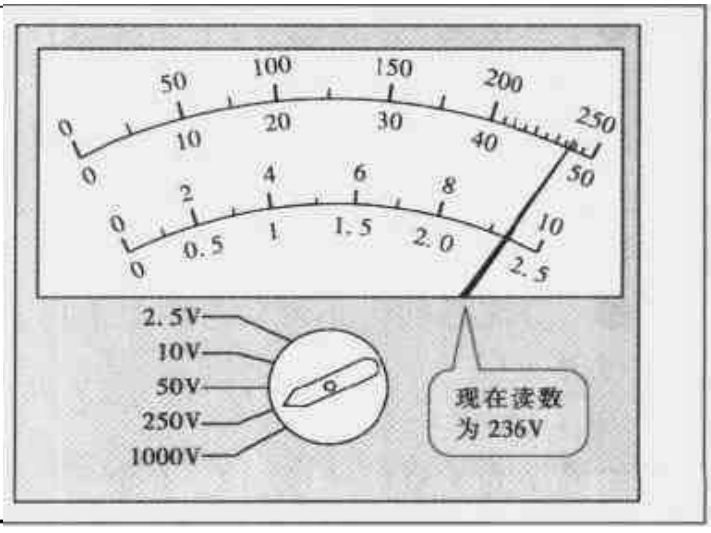
【解】　$m = 200/5 = 40$　　$R = r_v(m-1) = 500 \times (40-1) = 19500\ [\Omega]$

Let's try

### 选择量程

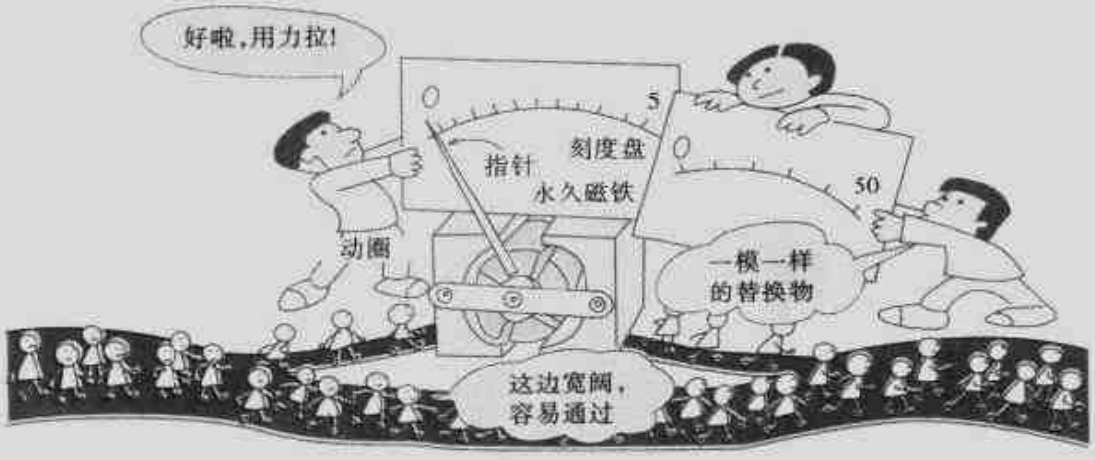
测量电压时，开始不知道多大数值时，要从最大量程测量。这是因为串联接入较大电阻，可减少损坏测量仪表的可能性。指针如右图那样时，请读出对于切换旋钮的各个位置的电压值。

答案见本章末的小结。




1）　倍率指的是电压表上的量程被扩大了多少倍。——校者注

# 8 分流器




## 旁路设置的基本理论

电流表是测量流过电路的电流的仪表。在测量仪表中，作为指针摆动的原动力的动圈是用非常细的导线缠绕而成的，因此当较大的电流流过时便会烧断。需要测量较大电流时，接入起**分流器**作用的电阻，形成电流的旁路。

接入分流器为什么可以测定较大的电流呢？分流器究竟是什么？试考虑一下如何决定分流器的大小。

❶ 分流器就是与测量仪表并联的电阻器。

❷ 在电阻的并联电路中，流过各分路的电流之比与电阻的大小成反比。

即，在对作为整体流过来的电流进行分流时，在较小的电阻上流过较大的电流（这是分流器的原理）。

❶ 分流器的大小可参考图 1 求得。

$$\underbrace{I_R R}_{\text{电压}} = \underbrace{I_a r_a}_{\text{电压}} \qquad \therefore R = \frac{I_a}{I_R} r_a = \frac{I_a}{I - I_a} r_a$$

如果 $I$ 为 100A，$I_a$ 为 1A，$R$ 就等于 $r_a$ 的 $\dfrac{1}{100-1} = \dfrac{1}{99}$ 倍。

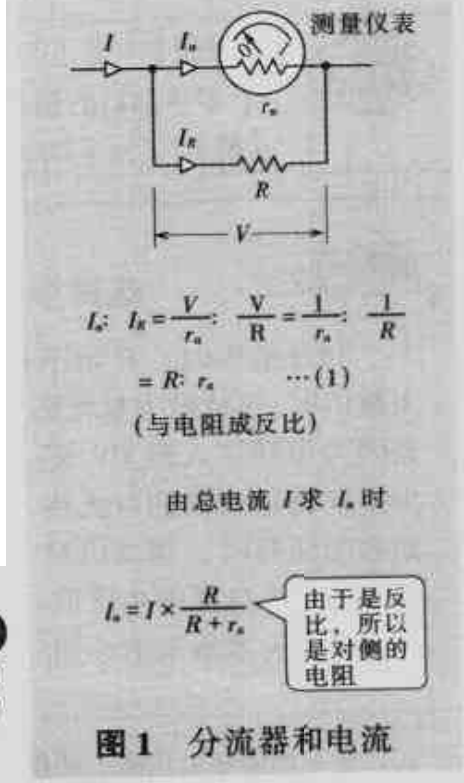



图 1 分流器和电流





由此可知，分流器的电阻为测量仪表内阻的 1/(倍率 − 1)。

## 设计多量程电流表

应用已经学过的理论按下述步骤进行多量程电流表的设计。

【条件】 ❶ 基本的测量仪表在 0.001A (1mA)时满刻度偏转(图 2)。

❶ 动圈的电阻设为 100Ω。

❶ 用基本的测量仪表加上分流器，可以用来测量 0 ~ 1mA，0 ~ 10mA，0 ~ 50mA，0 ~ 100mA 电流。

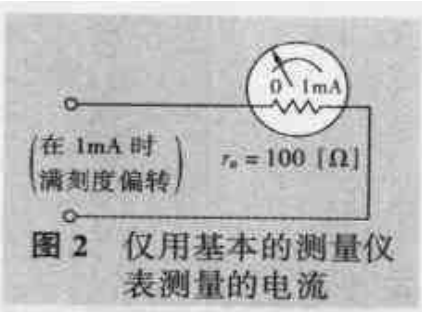


图 2 仅用基本的测量仪表测量的电流

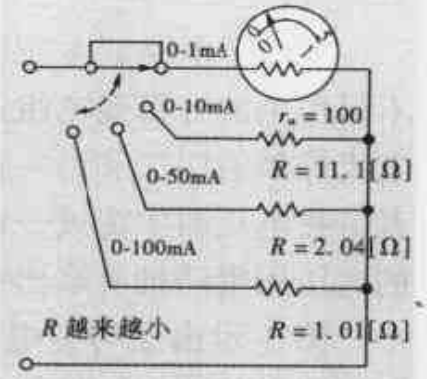


图 3 多量程电流表

**Step 1** 计算流过 1mA 电流，指针满刻度偏转需要多少[V]的电压。

$$V = IR = 0.001 \times 100 = 0.1\,[\mathrm{V}]$$

**Step 2** 为了构成 0 ~ 10mA 的测量仪表，在分流器上要有 9mA(0.009A) 的电流流过（9/10 倍）。并且，像在 Step1 中求得的那样，在测量仪表上需加 0.1V 电压，在并联的分流器上也需加要 0.1V 电压。因此分流器(R)的大小计算如下：

$$R = \frac{V}{I} = \frac{0.1}{0.009} = 11.1\,[\Omega] \left[ R = \frac{1}{\text{倍率} - 1} \times \text{电阻} = \frac{1}{10 - 1} \times 100 = 11.1\,[\Omega] \right]$$

其他分流器的值也可同样求得，如图 3 所示。

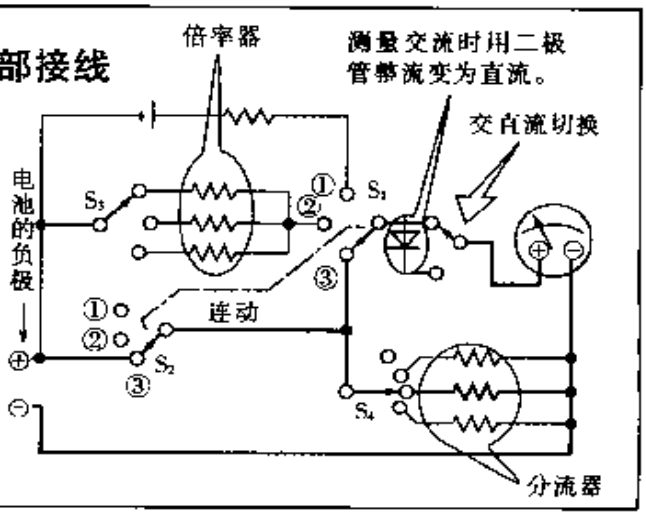


### 普通型万用表的内部接线

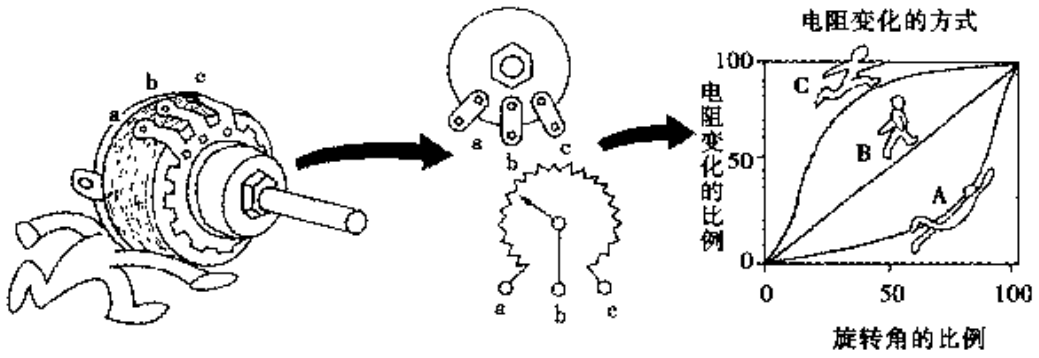
示出普通型万用表的基本接线。可知其中有使用分流器的电路。

参看右图，理解普通型万用表的结构。

$S_1$, $S_2$ 连动
①: 欧姆表
②: 电压表
③: 电流表
现在，切换到③，在使用一个分流器的状态下测量直流电流(粗线)。



# 9 可变电阻器的利用




## 可变电阻器

在电子电路通常所使用的元件中，其构造相同，但根据连接的方式起不同作用的有**可变电阻器**。这就是当电阻变化时，电流也随之改变的所谓**电流控制**的用法和另一种称为电位器的用法，后者是在电位器中流过一定的电流，把在其上产生的电压用滑动抽头取出的用法。

图 1 示出了可变电阻器的外形和把它画在电路图中的图形符号的例子。

另外，上述的两种用法归纳如下。

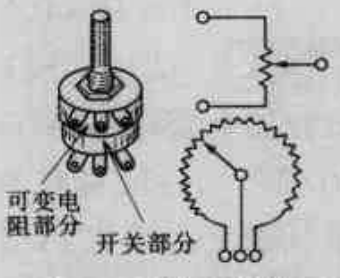



图 1 可变电阻器

❶ **作为变阻器(可调电阻器)**

如图 2(a) 那样连接时，在电路中流动的电流($I$)由电阻器的端子 1 流到 3，由于滑动端子 3 的移动，1～3 之间的电阻是可变的，如果电压一定，该电阻变化使电流 $I$ 改变。

❷ **作为电位器**

如图 2(b)所示连接，通常在电路中流过 $I = V/R$[A] 的电流，在 $R$ 上产生与电阻成正比的电压。即通过将滑动抽头 3 固定在 $R$ 上的某处而使在 3～2 之间出现的电压变化，这样，通过移动滑动抽头 3，就可以从 3～2 之间取出各种各样变化的电压(从 0[V]到 $V$[V])。

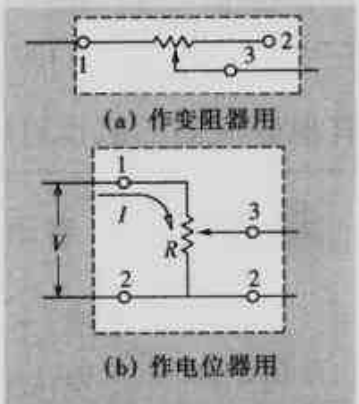
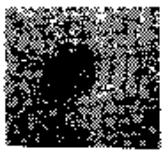



图 2 可变电阻器的用法





## 用电位器测量电压

电位器还有如下的用法：即把在电位器上产生的电压与其他的电压进行比较，用电位器上的电压值读取与之比较的电压。也把这称为**直流电位差计**。

例如，用万用表测量电池的电动势时，电流从电池流出来，万用表指示的电压不能正确地表示电池的电动势。之所以这样，是因为电池有内阻（$r$），当电流（$I$）流过时，产生电压降（$Ir$），万用表表示的是比电动势（$E$）低 $Ir$[V] 的电压 $V$（称为端电压）。当像图 3 那样接上小灯泡比较时，你就会明白由于内阻的存在，使得到达外部的电压下降。若点亮 2 个小灯泡就会流过较大的电流，电压降 $Ir$ 变大，灯光变暗。

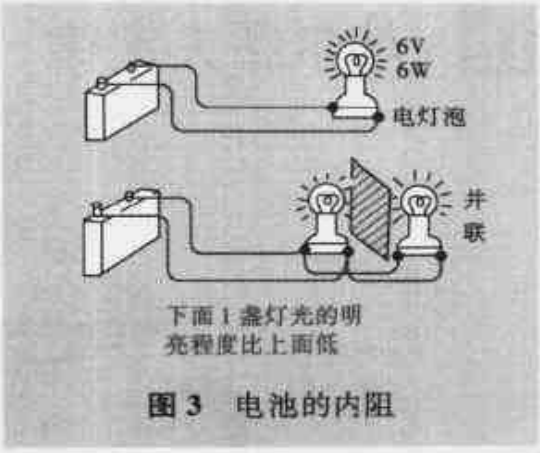



图 3　电池的内阻

端电压
$V = E - Ir$
电动势

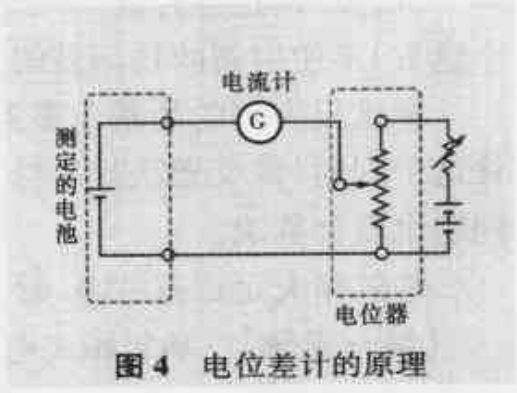



图 4　电位差计的原理

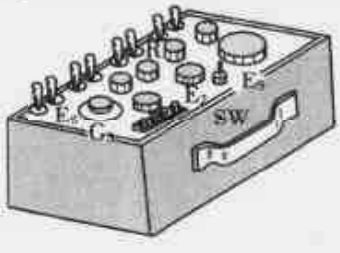
为此，不使电流流动的测量方法可以说是更加准确的测量。电流如何才能不流动呢？像图 4 那样在两电压之间接入电流计，若看到指针偏转到零时就是进行读数的最好时机（把这种方法称为零位法）。

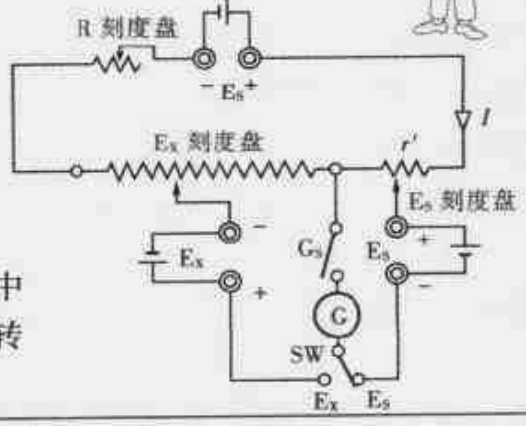



### 电位差计的外形和原理图



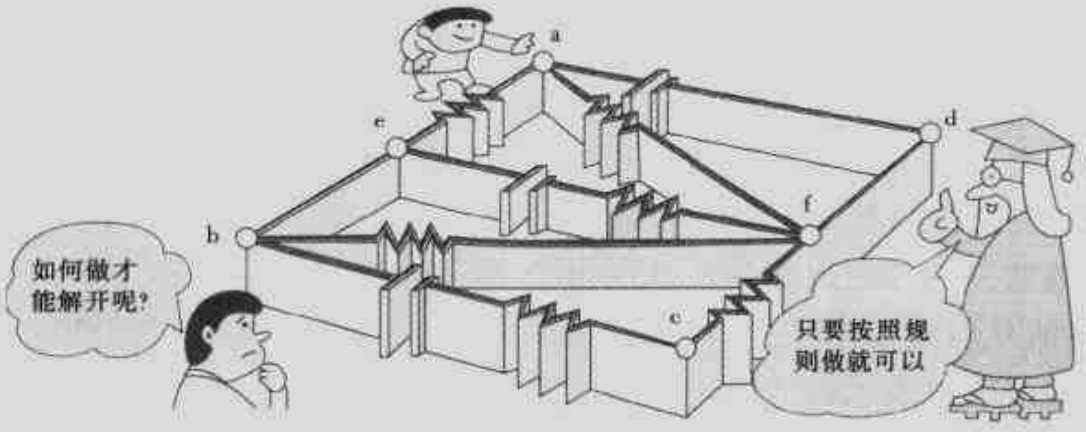
右面示出实际的电位差计的外形和电路的形式。Ex 是待测电池。




将开关 SW 倒向 Es 侧，转动 Es 刻度盘，正确地配合 Es（电路中流过规定电流），然后将开关 SW 倒向 Ex 侧，转动 Ex 刻度盘进行测量。

# 10 基尔霍夫定律




学驾驶首先要学交通规则

认为欧姆定律万能是人之常情，但稍微复杂的电路（例如电源接到两个地方）不使用新的技巧就解决不了。

在这里应用的是**基尔霍夫定律**。这也是一种规则，因此如果确实地记住这个规则（像交通法规那样），不出差错地去做的话，也就不会出现事故，问题也就会解决。

基尔霍夫定律有两条，每一条都要记住。

**【第一定律】** 基尔霍夫电流定律如图 1 所示，它指出“流入电路中的某个节点的电流的代数和为零”。另外一种表述是，流入某个节点的电流之和等于同一时刻从节点流出的电流之和。

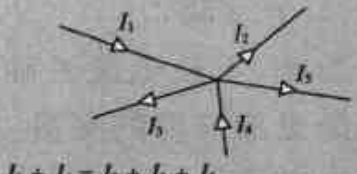



图 1 第一定律的例子

**【第二定律】** 这是有关电压的定律，它指出“在一个闭合电路中，电压降的代数和与电动势的代数和相等”。这个所谓闭合电路就是像题图中的 a－b－c－d－a 那样形成的环路。

图 2 还示出电压正负的表示方法。

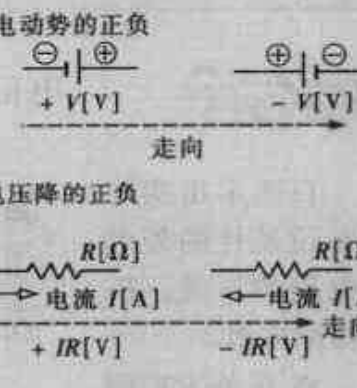
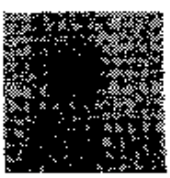



图 2 电压的正负的规定

**只有懂得“交规”，才能安全驾驶**

应用上述的两条定律，就能掌握解决电路问题的技术。



在图 3 中，首先在 a 节点应用第一定律：

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad \cdots\cdots (1)$$

其次在（Ⅰ）和（Ⅱ）的闭合回路中按照箭头的方向应用第二定律（正、负参照图 2），则下面的方程式成立：

$$25I_2 - 10I_3 = 40 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$10I_3 + 10I_1 = -20 \quad \cdots\cdots (3)$$

如果求解上述方程式，就可以计算各支路电流。计算的情况如右所示，自己也可以试做一下。

这样，若应用基尔霍夫定律，则电路的“迷路”之类问题就可得以解决。

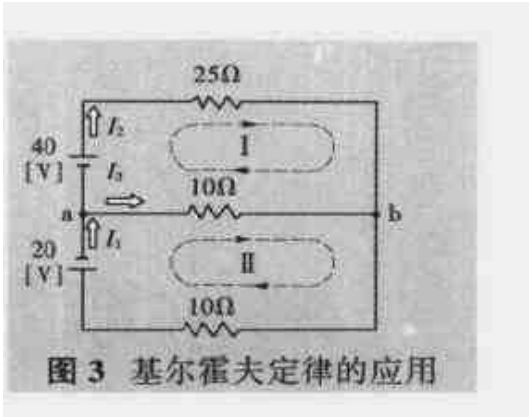


图 3　基尔霍夫定律的应用



将式(1)代入式(3)并整理，

$$10I_2 + 20I_3 = -20$$

$$(2)\times 2 \quad 50I_2 - 20I_3 = 80 \quad (+)$$

$$60I_2 = 60$$

$$\therefore I_2 = 1\ [\mathrm{A}] \cdots\cdots (4)$$

将式(4)代入式(2) $-10I_3 = 40 - 25$

$$I_3 = -1.5\ [\mathrm{A}] \cdots\cdots (5)$$

将式(4)，(5)代入式(1)

$$I_1 = 1 - 1.5 = -0.5\ [\mathrm{A}]$$

**基尔霍夫**（德国）1824～1887。发现求解流过电路网络的电流定律的人。




**用英语表述基尔霍夫定律！**

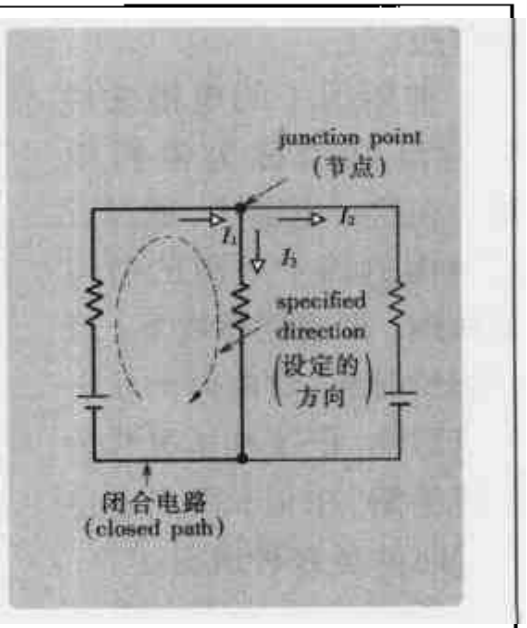
与电路图对照，严格地用英语表述如下：

【第一定律】 The algebraic sum of all the current directed toward a junction point is zero.
（代数和　全部电流　向××方向）

（流向一个节点的全部电流的代数和等于零）

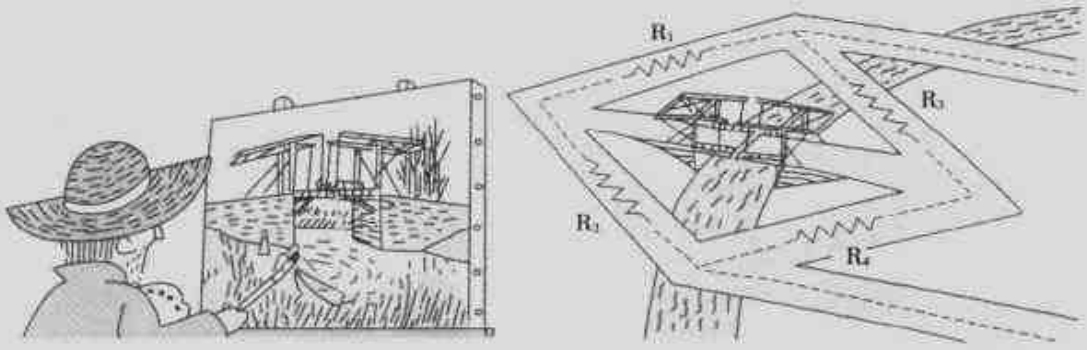
【第二定律】 The algebraic sum of all the voltages taken in a specified direction around a closed path is zero.
（全部电压　所取的　在设定的方向上　闭合电路的周围）

（环绕一个闭合电路，在设定方向上所取的全部电压的代数和等于零）



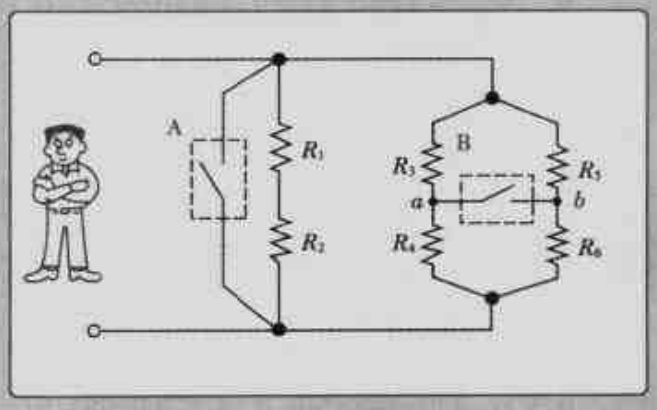



# 11 电桥电路




**用四个人的手对桥进行监视**

在被称为水之国的荷兰，在街道中有运河，在田园中也有纵横交错的灌渠。上面架着美丽的桥，形成了一道宁静优雅的风景线。如果在电路中也架上桥，在那上面就形成了电流的通路。这时桥的作用明确地由周围的状态决定，如果对此有深刻的理解，那么电路问题就可以不费劲地解决。




A桥　起与电阻 $R_1$、$R_2$ 为零同样的作用，称为短路或将 $R_1$、$R_2$ 短路。

B桥　连接 a、b 两点，形成电流的通路，称为电桥或者桥接。电流在通路中如何流动由 $R_1$ ~ $R_6$ 的电阻的大小的状态决定。

**图 1**　装上开关时，桥就架上了。这时，电路会怎样？

把用图 1 的电桥来说明的电路图称为**电桥电路**。在这个电路中，通过设定周围的四个电阻的值可以做到，即使把桥放下，或者把桥升起，对电路的状态没有影响。把这种情况称为**电桥平衡**，在 a, b 两点电位相等时就是这种情况。

所谓把桥放下来就是将 a, b 两点之间短路，所谓



把桥升起就是将 a、b 两点之间开路。

这种状态由周围的四个电阻的值（**平衡条件**）决定。

**使用电桥对电阻进行精密测量**

电桥电路通常画成像图 2 那样。

并且，电桥平衡条件成立也就是 c，d 的电位相等，在图 3 中示出电位相等这一层意思的说明。电桥平衡时下面的关系成立：

$$PI_1 = QI_2 \qquad RI_1 = XI_2$$

$$\therefore \frac{P}{R} = \frac{Q}{X} \quad \text{或者} \quad PX = QR$$

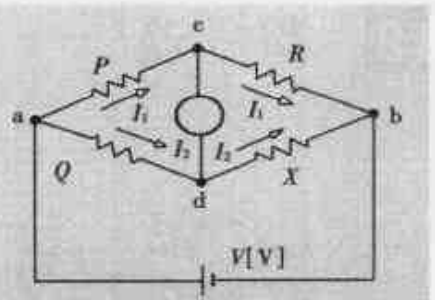
这里设 $X$ 为未知电阻，$P$、$Q$、$R$ 为已知电阻，则由下式求 $X$：

$$X = \frac{Q}{P} \cdot R$$

把使用此式测量未知电阻的电路称为**惠斯登电桥**。

由上式可知，适当调整 $R$、$P$ 和 $Q$ 分别仅取 10、100、1000 Ω 三种数值的组合，$Q/P$ 也就有 0.01 ~ 100 倍的变化，因此把 $P$ 和 $Q$ 称为**电桥的比例臂**。

已知 $R$ 和 $P$、$Q$ 的比例臂就可计算出 $X$。




由检流计Ⓖ中不流过电流可知 c 点、d 点的电位相等。

**图 2　电桥电路**

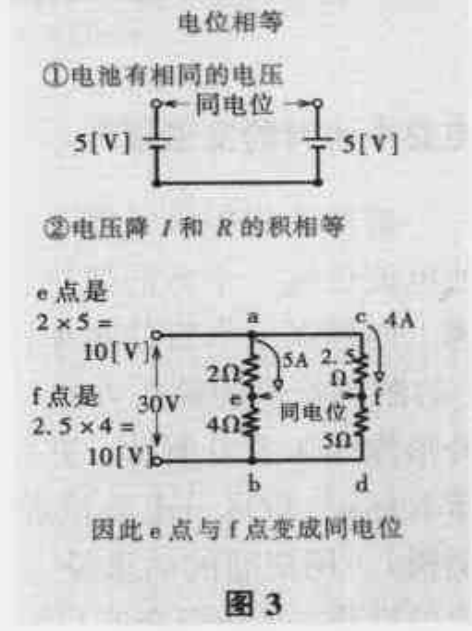



**图 3**

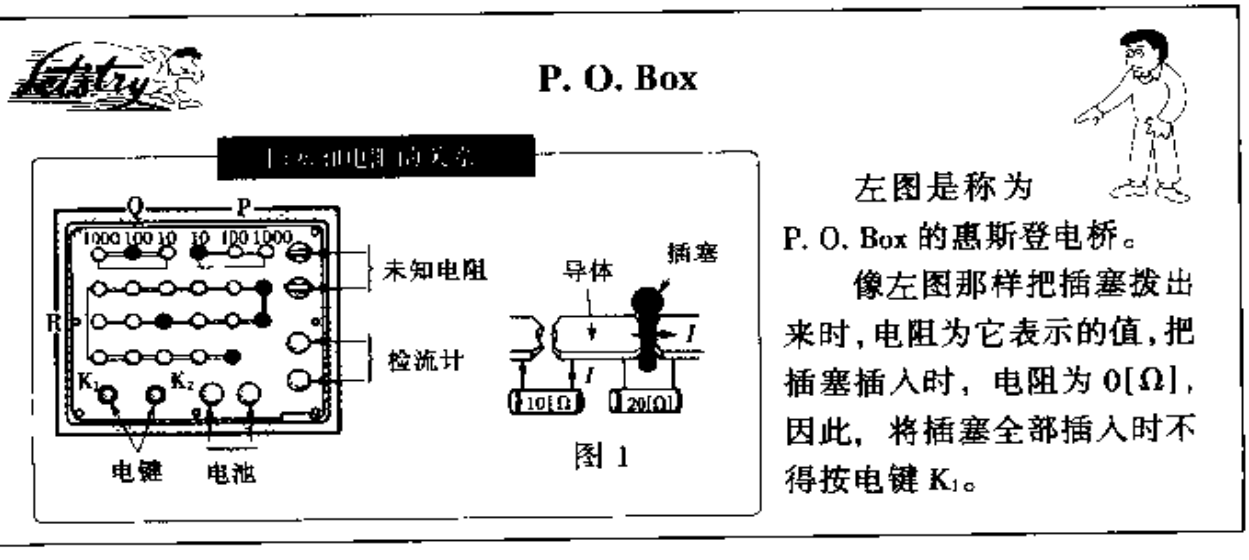



图 1

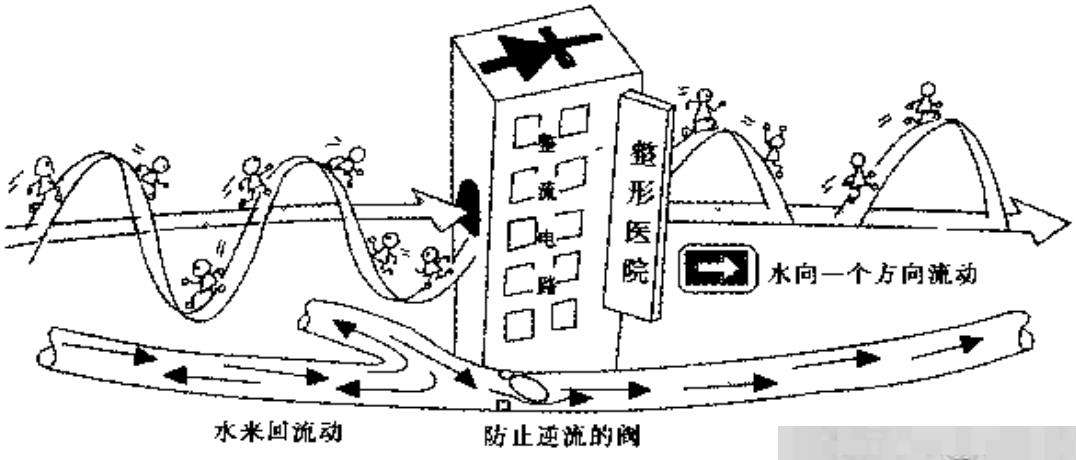
**P. O. Box**



左图是称为 P. O. Box 的惠斯登电桥。

像左图那样把插塞拔出来时，电阻为它表示的值，把插塞插入时，电阻为 0[Ω]，因此，将插塞全部插入时不得按电键 $K_1$。

# 12 整　流




## 电路中也有的交通规则

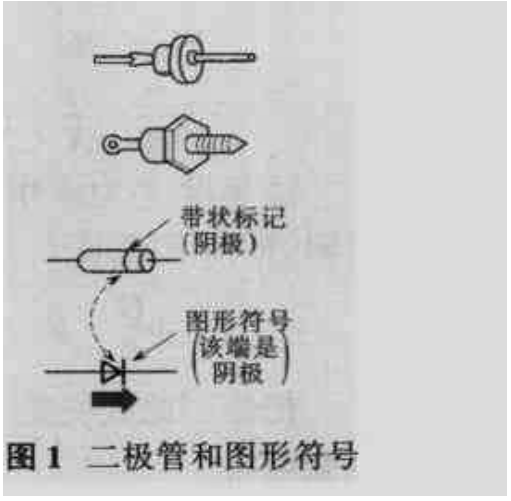
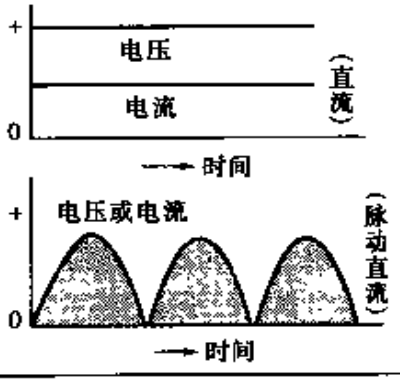


图 1　二极管和图形符号

被称为二极管（整流器）的器件的基本作用是使电流仅从一个方向通过，另一个方向不通过。也像上面题图中水管的阀那样。二极管中的电流按图 1 的图形符号的箭头方向单向流通，二极管的实际外形像图 1 上方所示。并且如图所示，在管壳上有带状标记，以区分电流流通的方向（极性为负，称为阴极）。用交通的话来说，这当然可以理解为是单方向通行的标记→，作为电的性质，就是把交流（方向和大小随时间一起变化）变为直流（方向不变的电流）。把这种方式称为**整流**。但是这时的直流，其大小随时间一起变化，像跳动的脉搏那样，因此称作**脉动直流**。普通型万用表（第 45 页）是一种直流仪表也能测量交流，因此，这是因为在表中装有二极管，对交流进行整流使之成为直流的缘故。

One point

直流是方向不变的电压（电流），交流是方向随时间变化的电压（电流）。右图画出的是电压（电流）实例的波形图，两图中电压（电流）的大小虽生变化，但电压（电流）的方向都不变。



## 用整流形成的直流功率控制

关于电作功的问题将在第 2 章“电流的作用”中学习，这里试列举控制电热器产生热量(即电功率)的方法。可知整流后的直流也是其中的一种方法。

**❶ 调节电阻的方法**

像图 2 的上面部分那样，将电热器（电阻）与电热器并联，使电阻减小，其结果电流增加，电功率增大。

**❷ 调节电压的方法**(参看图 2 中间部分)

这也可用第 2 章“电流的作用”的说明来理解。

**❸ 通过二极管的方法**

这是像图 2 的下面部分那样，交流被整流时，只有波形的一半有电流流过。与波形正、负半周都有电流流过的情况比较，如后者的电功率为 1，则前者作功的大小和时间只有 1/2。由此可知整流后的直流，其电功率为全波的 1/2。

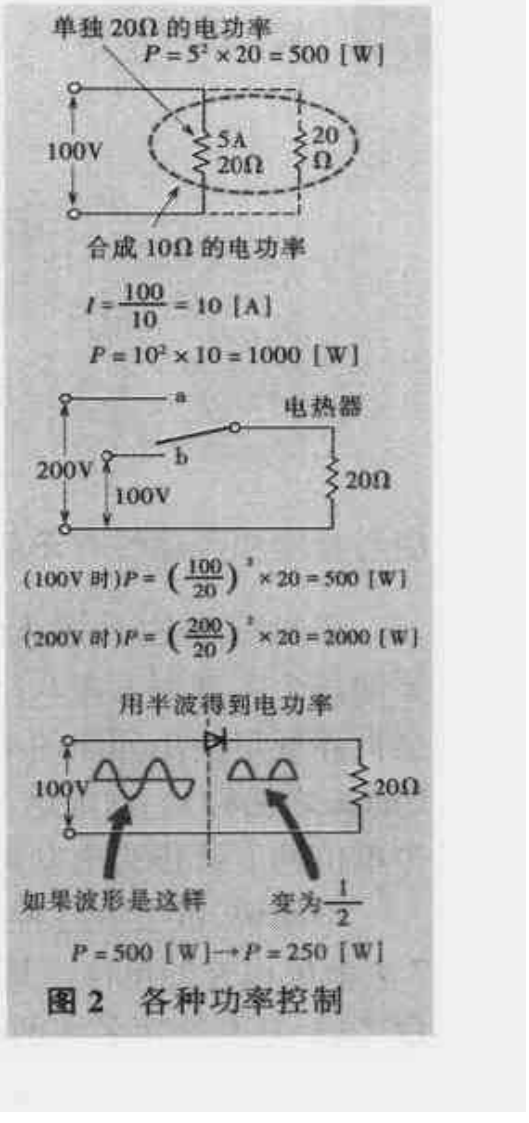


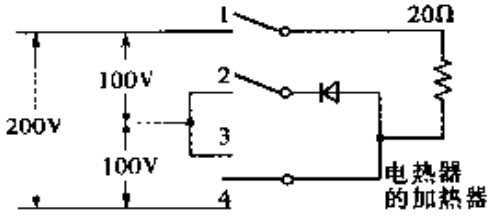
图 2 各种功率控制

Let's try

### 控制电功率的一个例子



右面列举用简单、廉价的方法构成的三种控制电路。试计算开关在不同位置时电功率为多少？



单相交流三线式

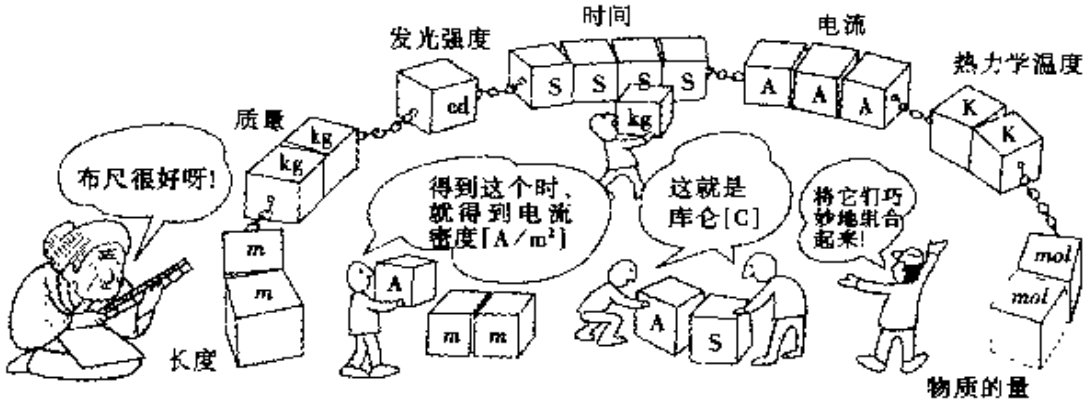
电热器和电阻一样，因此，交流也可以与直流一样来计算。

请考虑将开关的位置置于(1,2)、(1,3)、(1,4)的情况。

【答案】

| 开关位置 | 电流 ($I$) | 电功率 $I^2\times R$ |
|---|---|---|
| 1,2 | 电功率为$\frac{1}{2}$ | 250W |
| 1,3 | 5A | 500W |
| 1,4 | 10A | 2 000W |

# 13 SI 单位制




**便利程度和合理性有矛盾吗?**

买卖东西也好，求人制作也好，计量是非常重要的一件事情。如果全世界的每个人都用五花八门的单位来测量的话，那么一定会很混乱。为此，在全世界规定使用同样的单位，这就是**SI 单位**(法语 Systéme International d' Unités 之简称)。它规定 7 个**基本单位**(上面的插图)，并且以一种量使用一个单位的方针作为出发点。

不用说，世上有各种各样的量，仅仅 7 个基本单位是不够的。因此除这 7 个单位以外的单位也是把它们搭配在一起组成的。表 1 仅列举出这样组合之后，具有特定名称的导出单位中与电有关的单位。

如果单位统一，似乎很方便，但是进展到这个地步，也有由于长期以来一直用惯了的单位被废止而使人们感到困惑的情况(像日本年纪大的人习惯使用寸、尺，以及在美国习惯用的长度单位英尺和码等，都是非许用单位)。并且在科学研究中，对于小的量值，也有必要规定与之相适合的单位使之容易处理等的情况，也有因"统一"产生合理性，而又牺牲了便利性的情况。但是世界性的倾向，还是形成了 SI 单位制。

**表 1**

| 量 | 单位的名称 | 单位符号 | 定义 |
|---|---|---|---|
| 频　率 | 赫[兹] | Hz | $s^{-1}$ |
| 能量、热 | 焦[耳] | J | N·m |
| 功　率 | 瓦[特] | W | J/s |
| 电荷量 | 库[仑] | C | A·s |
| 电压，电位 | 伏[特] | V | W/A |
| 电　容 | 法[拉] | F | C/V |
| 电　阻 | 欧[姆] | Ω | V/A |
| 电　导 | 西[门子] | S | A/V |
| 磁通量 | 韦[伯] | Wb | V·s |
| 磁通密度 | 特[斯拉] | T | $Wb/m^2$ |
| 电　感 | 亨[利] | H | Wb/A |

此外，不是把所有的量都变为 SI 单位，目前也还有仍旧使用原来单位的量。电能的单位就是一个例子。在能量的单位中电能的单位必须变成[J]，但电能现用[W·h]，[kW·h]为单位，姑且照这样进行，但迟早会改变为[J]的。

$1[W \cdot s] = 1[J], \quad 1[W \cdot h] = 3.6[kJ]$。

## 16 个词头是什么？

由于量的大小不同，SI 单位有过大的单位，也有过小的单位，因此加上用于构成十进制倍数和分数单位的符号（称为词头）使用。词头规定 16 个，如表 2 所示。在使用词头的量中列举几个被广泛使用的例子，大致如下：

表 2

| 倍 数 | 名 称 | 符号 |
|---|---|---|
| $10^{18}$ | 艾[可萨] | E |
| $10^{15}$ | 拍[它] | P |
| $10^{12}$ | 太[拉] | T |
| $10^{9}$ | 吉[咖] | G |
| $10^{6}$ | 兆 | M |
| $10^{3}$ | 千 | k |
| $10^{2}$ | 百 | h |
| 10 | 十 | da |
| $10^{-1}$ | 分 | d |
| $10^{-2}$ | 厘 | c |
| $10^{-3}$ | 毫 | m |
| $10^{-6}$ | 微 | μ |
| $10^{-9}$ | 纳[诺] | n |
| $10^{-12}$ | 皮[可] | p |
| $10^{-15}$ | 飞[母托] | f |
| $10^{-18}$ | 阿[托] | a |

毫安

$mA = 10^{-3}[A] = 0.001[A]$

微伏

$\mu V = 10^{-6}[V] = 0.000\,001[V]$

千伏

$kV = 10^{3}[V] = 1000[V]$

兆欧

$M\Omega = 10^{6}[\Omega] = 1\,000\,000[\Omega]$

例如，当电压和电阻的值已知时，在用欧姆定律求电流的计算中如电阻用[kΩ]，电流用[mA]，则不能使用词头进行计算。

$$\frac{[V]}{[k\Omega]} = [mA] \quad \left(\frac{V}{10^{3}\Omega} = \frac{V}{\Omega} \times 10^{-3} = A \times 10^{-3} = [mA]\right)$$

### 计算的秘诀

带词头的计算如右示那样时，就能正确地完成。



1. 正确地换算单位，变为 $10^{n}$ 的形式。

$0.01[m] = \frac{1}{100}[m] = 10^{-2}[m]$，$25[cm] = 25 \times 10^{-2}[m]$

2. 把在分母中的 10 的乘方的数写在分子上。

$\frac{1}{10^{3}} = 10^{-3}$（加上负号）　　$\frac{1}{10^{-6}} = 10^{6}$（成为 $-(-6) = +6$）

3. 用指数的形式计算（$10^{n}$ 的乘法是指数的和，除法是指数的差）

$$9 \times 10^{9} \times \frac{5 \times 10^{2}}{3 \times 10^{3}} = \frac{9}{3} \times \frac{5}{3} \times 10^{9+2-3} = 15 \times 10^{8}$$

# 14 元件和图形符号



## 技术工作者不需要语言

像上面的题图那样，外国人在日本购物时，也许认为如果语言不通，买不了东西，但是用画在题图中的符号和在题图中所示物品的规定数字就可以表达自己的意思。就工业领域而言，既使人不在现场，也能用某种符号把自己要做事情的内容传达给对方，工业技术人员都能理解其内容，除电以外的其它领域，也能这样。这就是图形符号，用图形符号画的图可以说是技术人员的共同语言。为此，在日本也有由 JIS（日本工业标准）统一规定的图形符号，在工业的各个领域中使用。

## 从实体接线转变到图形符号接线

图 1 是作为百姓交通工具所使用的公共汽车的“停车显示电路”。该电路是当按下停止按钮时，灯一齐点亮；公共汽车到达停车场，下车门打开时，灯同时熄灭。

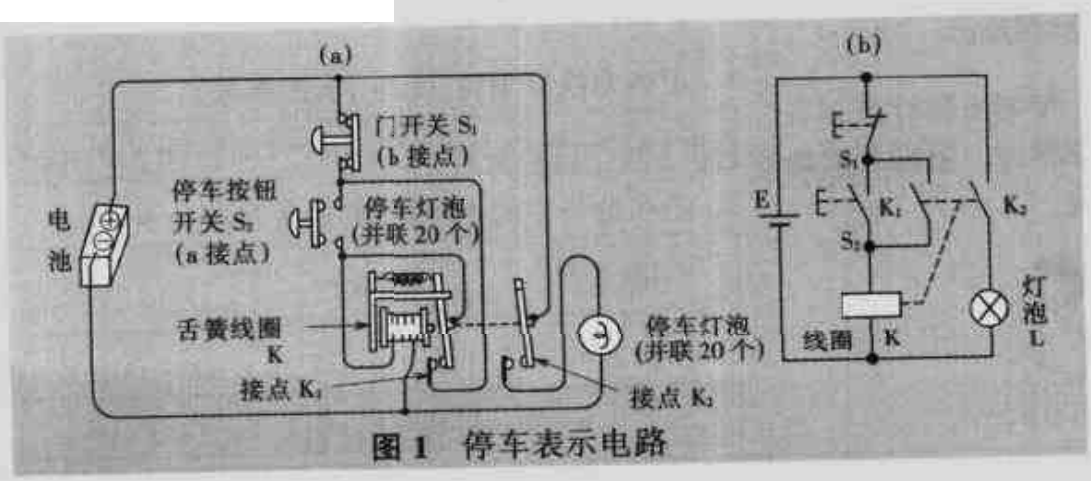



图 1 停车表示电路

图 1(a) 是用实体接线表示停车显示电路的接线图。电路的工作程序是，当按下 20 个左右的停车按钮中的某一个时，继电器线圈 K 励磁，铁片吸住，接点 $K_1$ 和 $K_2$ 接通。来自电池的电压加上，灯泡点亮。同时由于 $K_1$ 接通，形成自保电路，即使切断 $S_2$，继电器线圈继续励磁。当驾驶员开门($S_1$ 断开)时，自保持电路被切断，灯同时熄灭。

图 1(b)是用图形符号表示实体接线图的电路图形。是很简洁的电路。但是若没有牢固地掌握由 JIS(日本) 规定的图形和符号时，电路图当然就无法读懂。下面整理一下电路元件和图形符号的关系。

## 电工用图形符号——照菜单点菜

日本 JIS C 0301 电工用图形符号的表示方法如下表所示。JIS 标准不是绝对不变的，因此当国际标准更新时，JIS 标准也会同步改变。

图形符号是否是新的，需边查明边使用。

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ---------- | 表示联动 | | 按钮开关<br>(a 接点) | | 导线的分支·交叉<br>(连接) |
| ---------- | 手动操作 | | 按钮开关<br>(b 接点) | | 继电器的线圈 |
| ---------- | 按 操 作 | | 开　　关<br>(单刀双掷型) | | 白炽灯<br>(灯泡) |
| | 一般接点<br>(a 接点) | | 接　　地 | | 二极管 |
| | 一般接点<br>(b 接点) | | 导线的交叉<br>(不连接时) | | 交流插头<br>(双芯) |

### 记住图形符号

使用 JIS 符号画电路图。它也刊登在制图的教科书中，可以参阅。在图形符号的旁边写上标称值或者名称、型号名，也要理解它(有省略表示)。

❶ 电阻的场合

小于 1kΩ 表示为 Ω，大于 1kΩ 表示为 k(千)(kΩ 之略)，M(兆)(MΩ)。




❷ 电容的场合

[μF] →μ(微)，[pF] →p(皮)





# 本章小结



## 1. 学会正确使用公式



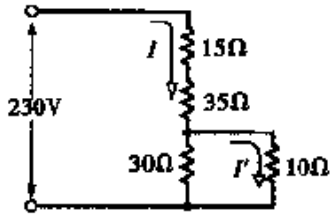
假如经常说大话："只要是电学问题，我都懂"，朋友带着下面的问题来。如何解答呢？！学习第 41 页的内容吧。

【问】 流过 10Ω 的电流 $I'$ 为多少[A]?

【提示】 (1) 求 30Ω 和 10Ω 的合成电阻

(2) 求总的合成电阻

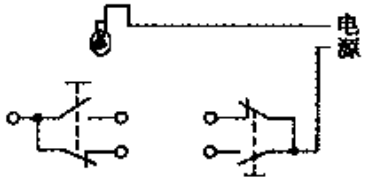
(3) 然后算出总电流




## 2. 弄清便利的原因



从邻居家女孩那里听说"我家的楼梯的电灯无论在楼上还是在楼下都能自由地开关，不知道这是怎么回事？"作为提示，请以第 39 页上介绍的开关的内容为基础说明。(不管将开关倒向哪一边都能形成电流的通路)




第 43 页 Let's try 的(解)

2.5V 量程——2.36V

10V 量程——9.44V

50V 量程——47.2V

1000V 量程——944V



[1] 解

(1) 求 30Ω 和 10Ω 的合成电阻。

$$\frac{30\times10}{30+10}=\frac{300}{40}=7.5\ [\Omega]$$

(2) 求总合成电阻。

$$R=15+35+7.5=57.5\ [\Omega]$$

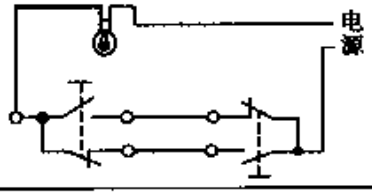
(3) 算出电路电流

$$I=\frac{V}{R}=\frac{230}{57.5}=4\ [\mathrm{A}]$$

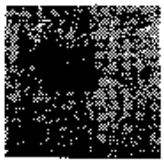
(4) 因为 4A 电流与 10Ω，30Ω 的大小成反比流过，所以流过 10Ω 的电流 $I'$ 为

$$I'=I\times\frac{30}{10+30}=4\times\frac{30}{40}=3\ [\mathrm{A}]$$

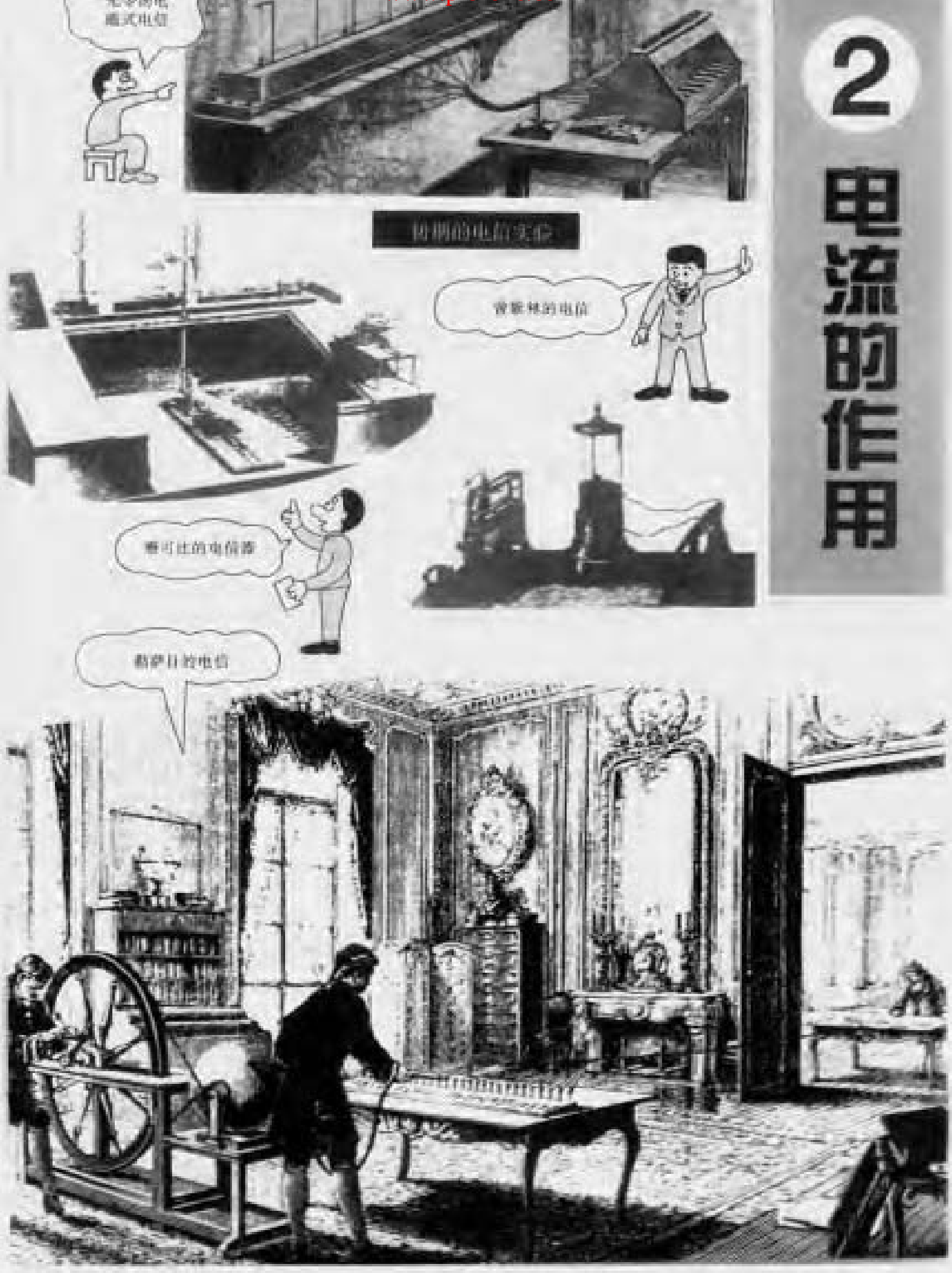
[2] 解




认真学习电的基础是重要的。要戒骄戒躁，根据自己的具体情况继续努力。



# 2 电流的作用





# 本章要点及学习方法

蓄电池液良好

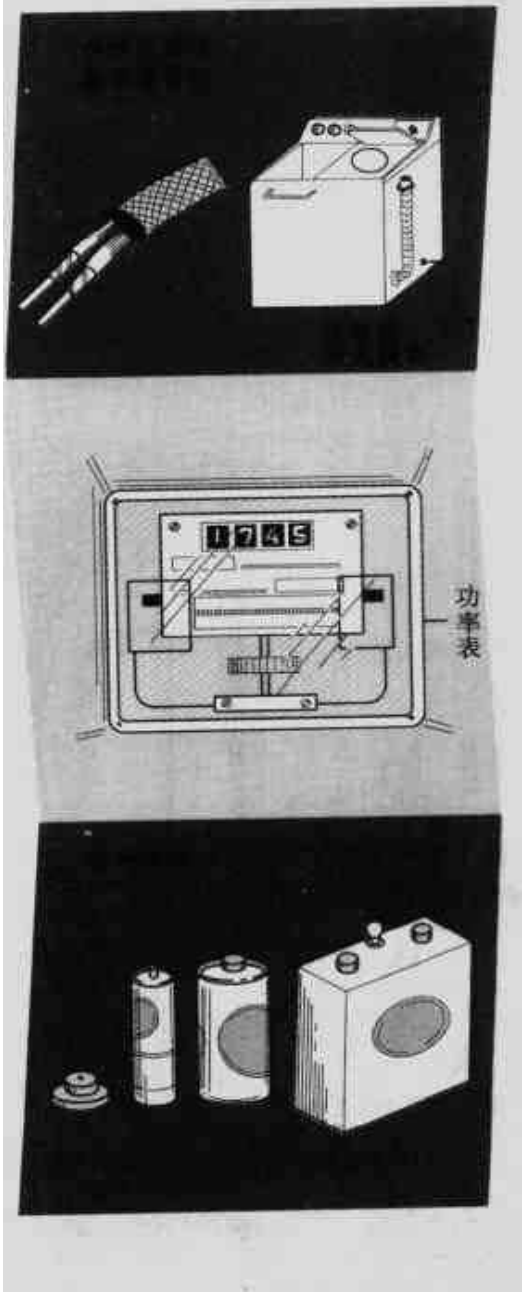
发电和用电是互相关联的。上一章讨论电的本质时，就已进入了微观世界的研究，我们学习了电子的分布，以及推动电流流动的电动势。

本章，我们将从各种角度讨论电动势发生的机理，尝试以多种多样的方法进行探讨。

然后，再深入地看一看用电时，首先作为热得到多大的能量？并且为了产生那样的热，对电路有什么限制？

当对成为热的发生源的电阻进行更详细的研究时，就可以阐明某种性质。充分利用这些性质，能使我们的生活丰富多彩，另一方面去研究利用那些热时必须考虑的一些问题。电动势开始以化学作用产生为主，科学工作者多年来一直研究能否将光能，尤其是太阳能转变为电能，并终于得以实现。其装置的价格性能比现在还相当高，但从能源的利用这一点来看，已成为全世界关注的焦点。

当进一步深入研究这种形式的其他

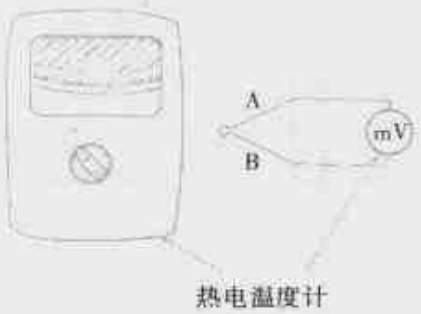





的能量转换时，会遇到用什么材料的问题。从这种观点出发，彻底弄清电阻的性质是非常重要的。

只要探讨，就可使电世界的种种现象一步一步清楚起来，在这个意义上，本章将要学习

1. 电阻。
2. 功和热能的性质及利用法。
3. 电动势的产生。
4. 能量转换的几个例子。



热电温度计



## 本章要学习的内容

电阻有各种的性质。并且电阻这一名称也因场所不同而不同。这里将讨论这些问题。

讨论除电池外产生的电动势，以及将光转换为电的作用，反之亦可等。会变成什么样子？




作功是重要的概念。在电学中，怎样定义功，这些问题是重要的。

最一般的电源是电池。

1790 年意大利科学家加伐尼在青蛙的解剖中用两块金属片夹住青蛙被切断的腿时，有产生痉挛的奇怪现象。现在有什么样的电池呢？



阐明几种利用电作功的方法。

# 1 电阻的性质




决定电阻值的四个要素

用电时,电阻会起很大的作用。即在许多电力机械、电子仪器中,电阻用于降低电压、限制电流等的目的。因此正确地了解电阻的性质是重要的。电流的流动是物质中自由电子的移动,电流的流动也受到自由电子的多少以及自由电子的热运动的妨碍。而且像在题图中那样,电流的流动也因物体的截面积的大小、物体的长短而不同。因此,与电阻的大小有关的因素是①**物质的种类**;②**温度**;③**截面积**;④**长度**(关于温度将在下一节中讨论)。

图 1 表示的是某种导体的长度一定,截面积 $A[\mathrm{mm}^2]$ 变化时电阻值变化的情况,这是一种呈反比关系的曲线。

图 2 示出导体的截面积一定,长度 $l[\mathrm{m}]$ 变化时电阻值的变化。

这时是一种呈正比关系的曲线。

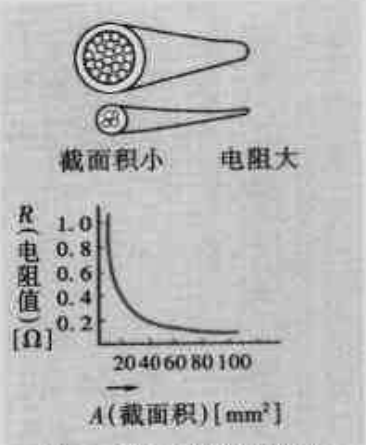



图 1 截面积的变化

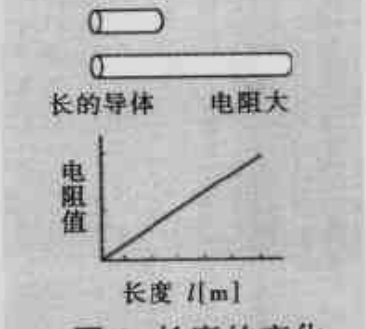



图 2 长度的变化

## 电 阻 率

如图 3 所示,当知道在同样温度下单位长度、单位截面积材料的电阻(一般用 $\rho$ 表示,称为该导体的**电阻率**,单位用[Ω · m]表示)时,对于同样材料的导体,求得长度和截面积后便可以计算其电阻值。并且,比较物质的电阻率,另外,对物质的电阻率进行比较,可得物质分为电流容易流动的



质→导体，几乎不通过电流的物质→绝缘体，介于导体和绝缘体之间的物质→半导体（图 4）。

深入地研究了电阻的机理，现归纳如下。对于同样材料的导体，其长度和截面积与电阻之间的关系→“电阻（$R$）与导体的长度（$l$）成正比，与截面积（$A$）成反比”。这时的比例常数是电阻率（$\rho$），下式成立：

$$R=\rho\frac{l}{A}$$

并且，将 $\rho$ 的倒数 $1/\rho$ 称为**电导率**，用 $\sigma$ 表示，单位为[S/m]。它表示电流的流动难易程度（表 1）。



图 4

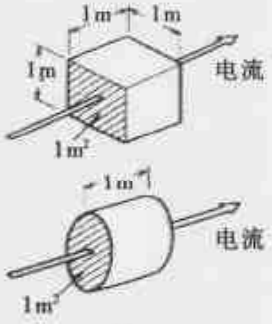


图 3 电阻率

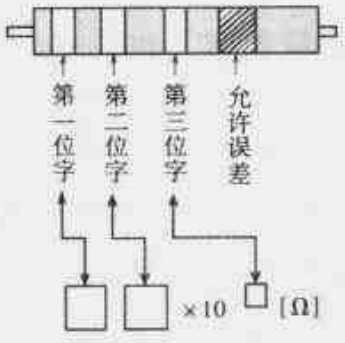
表 1 电流的流动难易程度

| 流动难易程度 | 类别 | 电阻率 |
|---|---|---|
| 非常好 | 银 | 1.62 |
| | 铜 | 1.72 |
| 好 | 金 | 2.40 |
| | 铝 | 2.62 |
| 较好 | 钨 | 5.48 |
| | 锌 | 6.10 |
| | 黄铜 | 7.00 |

## Let's try 色标的读法

电阻器之一的实心电阻在其外侧的绝缘体上涂有色带，用它表示电阻值。




第二位的颜色顺序

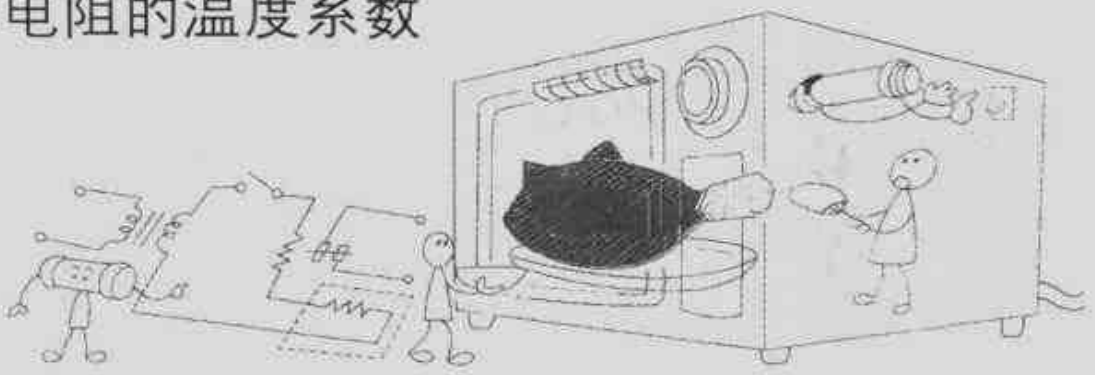
0…黑(black)
1…茶色(brown)
2…红(red)
3…橙(orange)
4…黄(yellow)
5…绿(green)
6…蓝(blue)
7…紫(violet)
8…灰(grey)
9…白(white)

【例】

| 第1 | 第2 | 第3 |
|---|---|---|
| 红 | 绿 | 茶色 |
| (2) | (5) | (1) |

2 5 × $10^{1}$ = 250 [Ω]

## 2 电阻的温度系数

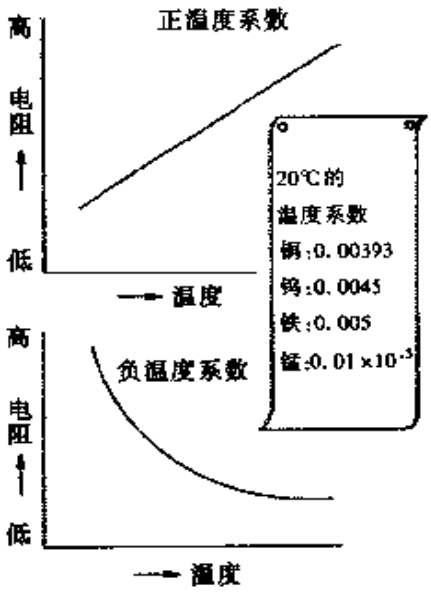


电阻随温度变化

在自动调节室温时，或在增加或减少烹调的热量时，以及在控制暖气（冷气）设备的电动机的运转时，都是通过把炉子中的电热器“接通”、“切断”来进行的。

为此，都要把温度锁定在某一定值，其结果是，都要用电的方法将信号传到机器上。把直接感受温度的变化，将其结果转换成电信号的元件称为**传感器**或**检出器**，这时，利用了物质的电阻随温度变化的这种性质。

一般来说，物质的电阻，其电阻值随温度变化，**金属**的电阻**随温度上升而增加**，**碳**、**电解液**、**绝缘体**等的电阻则**随温度上升而减少**。图1是把这情况表示成曲线图的示意图。




$R_2 = R_1(1 + 温度系数 \times 温度差)$

图1　电阻随温度的变化

而且，把相对于1℃温度变化的电阻值的变化称为**电阻的温度系数**。在图1中示出温度系数的一例，一般当设 $t_1$[℃] 的电阻值为 $R_1$[Ω]，$t_2$[℃] 的电阻值为 $R_2$[Ω]时，将温度系数表示为 $\alpha_1$，则用下式可求 $R_2$：

$$R_2 = R_1\{1 + \alpha_1(t_1 - t_2)\}$$

### 对温度敏感的热敏电阻

温度计和恒温箱，作为对热的变化敏感的装置已为人们所熟知。**热敏电阻**是对热有敏感反应的电阻体，用英文字研究这个名称时就成为图2那



样，从而可以明白热敏电阻名称的由来。

热敏电阻分为两大类。



❶ 温度上升时，电阻值增加的正温度系数(PTC)热敏电阻

❶ 温度上升时，电阻值减小的负温度系数(NTC)热敏电阻



图 2

对这两类热敏电阻的温度特性进行研究就得到图 3 所示的曲线图。

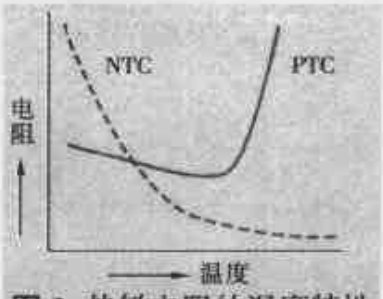


图 3 热敏电阻的温度特性

NTC 型热敏电阻，其电阻值随着温度的增加而按反比例关系降低，PTC 型热敏电阻则相反，在某个温度以上，电阻急剧地增加。

利用正温度系数热敏电阻的这种特性的装置是 PTC 半导体电热器，它可以通过电热器本身控制温度。

NTC 热敏电阻的用途多种多样，例如，若汽车的冷却水的温度上升，则热敏电阻的电阻值下降，像图 4 那样，在仪表上显示温度。



图 4 热敏电阻的利用

负温度系数热敏电阻的这种特性也在恒温器、量程等的温度调整方面得到应用。

用 Mn、Co、Ni、Fe、Cu 等过渡性金属的氧化物的复合烧结体制造热敏电阻，作为工业测量用的，工作温度达 2000℃左右的热敏电阻也正在开发中。

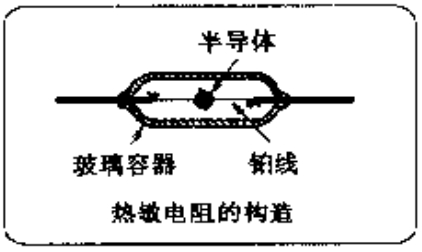
### 热敏电阻的测试

试使用灯泡和普通型万用表(欧姆表)做热敏电阻的测试。

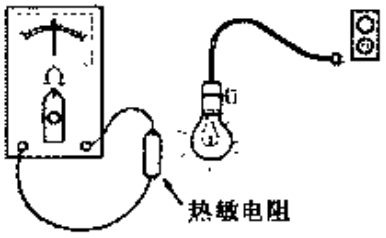
❶ 接上 220V 的灯泡，等待灯泡稍微变暖。

❶ 用欧姆表的表笔连接热敏电阻，使用切换开关，使欧姆表的指针大致调整到刻度盘的中间位置。

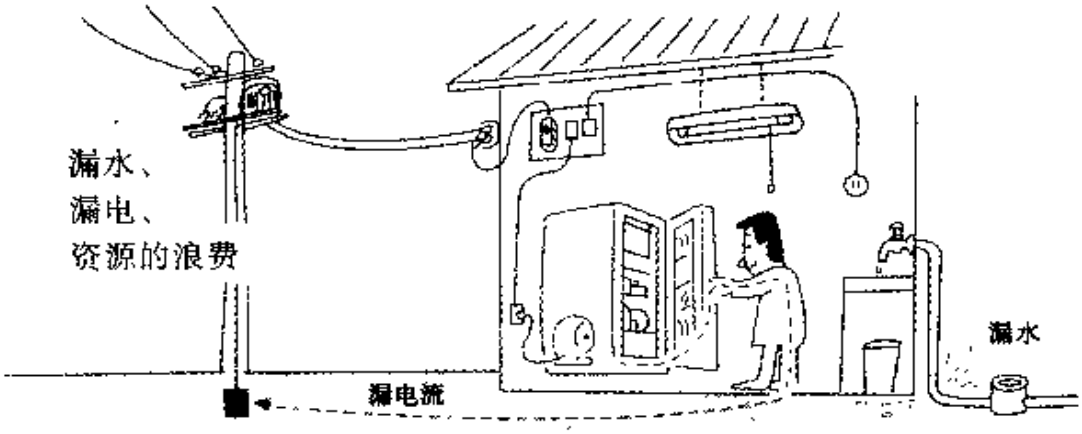
❶ 使灯泡靠近热敏电阻。若指针向右偏转(电阻减少)，则为 NTC；若指针向左偏转，则为 PTC。



热敏电阻的构造



## 3 绝缘电阻




**电是如何泄漏的？从哪里泄漏的？**

使电流在其中流动的电线称为电路，作为原则，电路在使用时应与大地绝缘。此绝缘就是被称为绝缘体的物质，绝缘是通过在导体周围包上绝缘体来实现的，当加上直流电压使用时，非常微弱的电流通过这个绝缘体流动。把这个电流称为**漏电流**，而把绝缘体的电阻称为**绝缘电阻**。

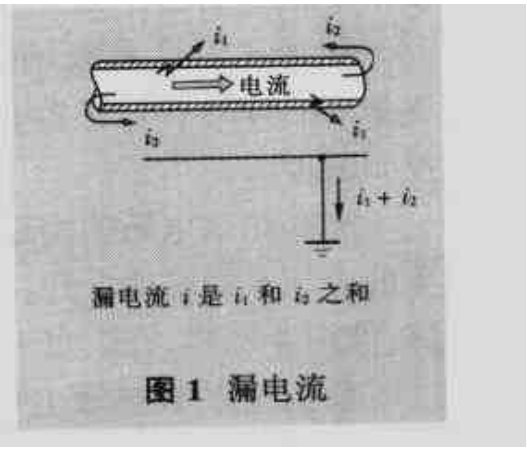



图 1 漏电流

此漏电流如图 1 所示，当仔细地考虑时，可以认为是穿过绝缘体内部的电流 $i_1$ 和沿着表面流动的表面电流 $i_2$ 之和。

本来，绝缘体电阻特别高，可以认为几乎不通过电流，但因环境温度和湿度，以及工程状态的影响而有漏电流流动。但是，通常情况下，由于漏电流非常小，我们可以放心地使用被绝缘的电线。

> **One point** 绝缘电线的绝缘电阻与电线的长度成反比。其原因是如果长度越长，则漏电流与长度成正比地增加。

【例题】 如果绝缘电线长度为 300m，绝缘电阻为 50MΩ，1km 左右电线的绝缘电阻为多少？

【解】 $300 : 1000 = \underbrace{R : 50}_{\text{因为是反比例}}$ $\qquad R = \dfrac{50 \times 300}{1000} = 15\ [\mathrm{M\Omega}]$



这样，电线长度增加，绝缘电阻成反比地减少。



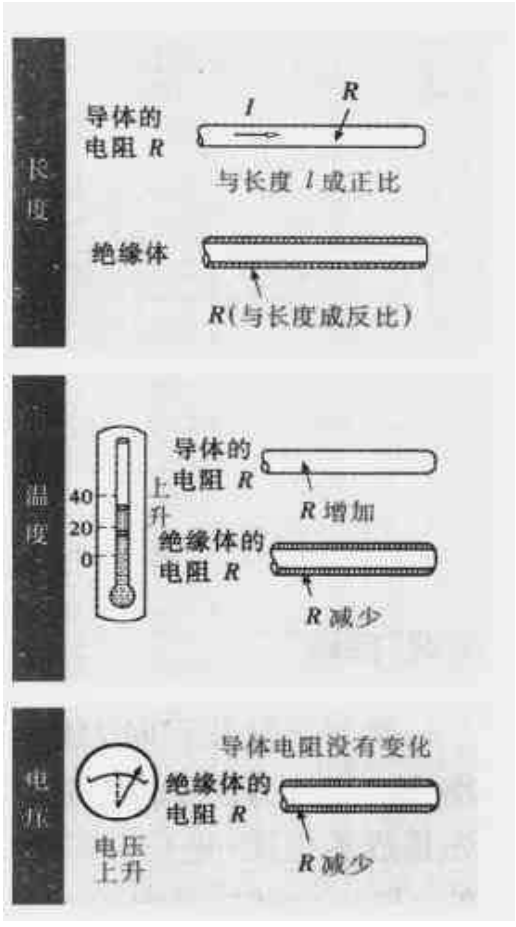
## 同样是电阻，性质却不同

对于绝缘导线的导体的电阻和包围它的绝缘体的电阻，同样是电阻但性质不同。从这种不同也可知在使用上有各种各样的限制。

❶ **关于长度** 导体的电阻与长度成正比，绝缘体的绝缘电阻与长度成**反比**。这是因为绝缘体越长，漏电流越大的缘故。

❷ **温度的上升** 导体电阻随着温度上升而增加，但绝缘电阻随着温度上升而减小。温度成为决定绝缘电线的容许电流（参看（8）的要素。电流流动时还要产生热，在不使绝缘恶化的范围内决定电流值。

❸ **电压** 电压升高时，绝缘电阻减少。为此在高电压的电路中，应当使用高绝缘电阻的导线。




这里关注绝缘电阻，对其进行了仔细研究。

### Let's try 电线和大地之间的绝缘电阻的测量

家庭室内布线的绝缘电阻如何测量好呀！这只要在配电盘上切断限流器的开关，在每个支路的开关上使用绝缘电阻表（称为兆欧表）测量就可以。在右表列出了基准值，但必须超过表中所列出的基准值。

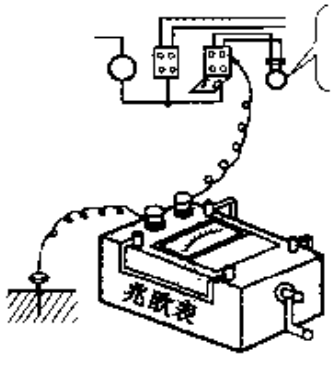
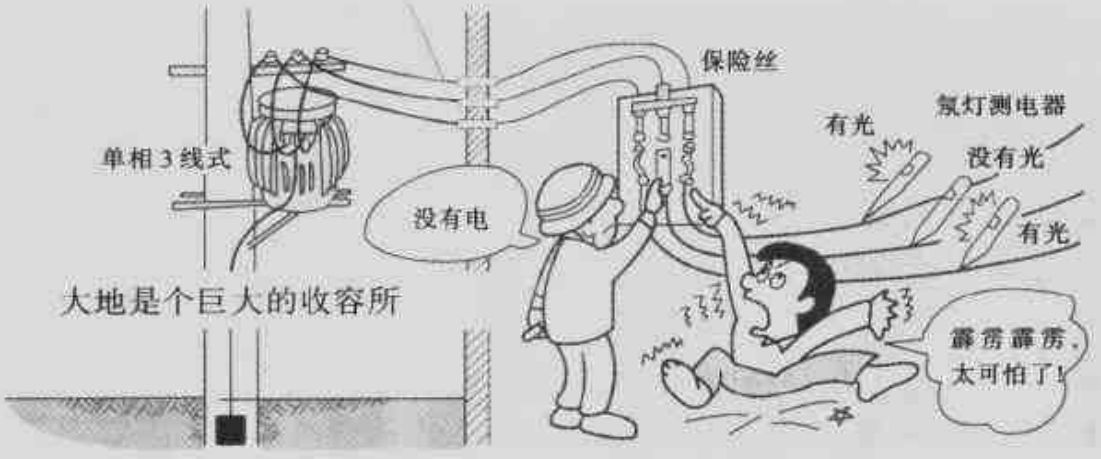





表 1

| | 电压 | 绝缘电阻值 |
|---|---|---|
| 低压 | 对地电压 150V 以下时 | 0.1MΩ 以上 |
| | 对地电压大于 150V 小于 300V 时 | 0.2MΩ 以上 |
| | 超过 300V 的低压（600V 以下） | 0.4MΩ 以上 |

## 4 接地电阻




所谓“接地”

学习电气知识时大地是个非常重要的因素。前面研究电的本质时，把物质进行细分，考虑的是微观世界，但与此相反，作为庞大物体的地球，首先是成为电压(电位)的基准(零电位)。另外，接到大地的是电路的一部分，或者是电气设备的外壳，这部分就与大地同电位。在电气设备外壳接地的情况下，确实能起到保护作用，带电部分(也称为充电)发生故障碰到外壳时，可以防止人等与之接触时发生触电。这样，从安全方面考虑，用导体把非充电部分接到大地称为接地。如上所述，所谓接地就是与大地同电位，即零电位(图1)。

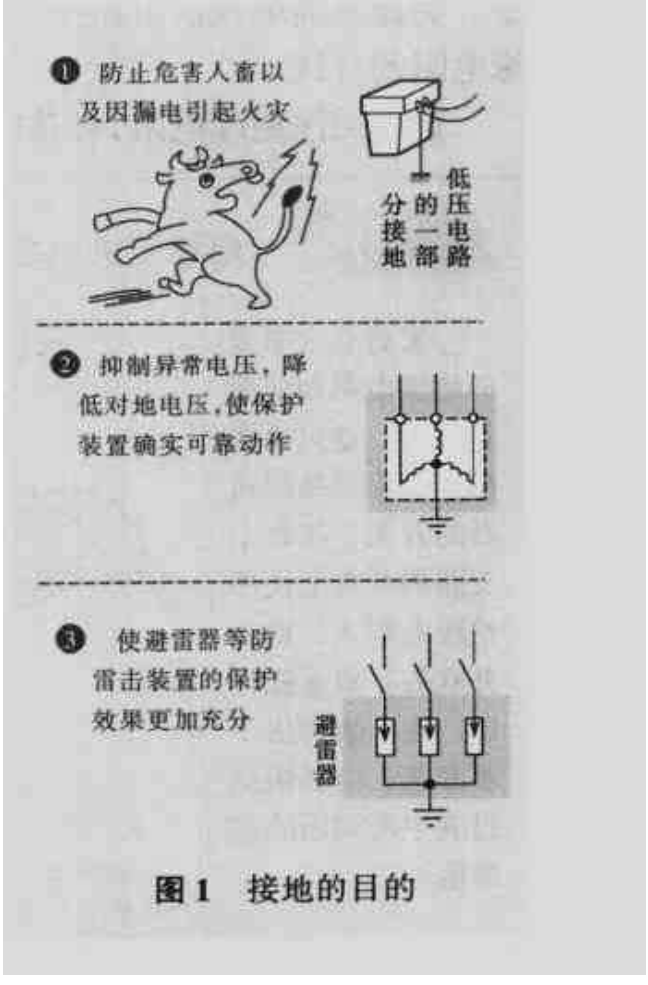



图1 接地的目的

### 大地也有电阻吗？

如上所述，可知地球的电位为零，也就是说，即使碰到地球也不会有电。尽管有电流流经地球，地球的电位也不变。

因此，地球或许就是个巨大的电气收容所，所以，用电时，在世界上任何地方都



与大地同在一处，当然都进入到这巨大的收容所(图 2)。然而，作为实例，就像要理解人的“思考”与“想法”那样，即使与某人的“思考”共鸣，也不能完全理解其想法，同样，接地时，把接地棒或接地板插入大地，当然会有电阻，不是完全与大地成为一体。这样的接地棒（板）与大地之间产生的电阻叫做**接地电阻**。

当然，不应当认为大地有电阻。

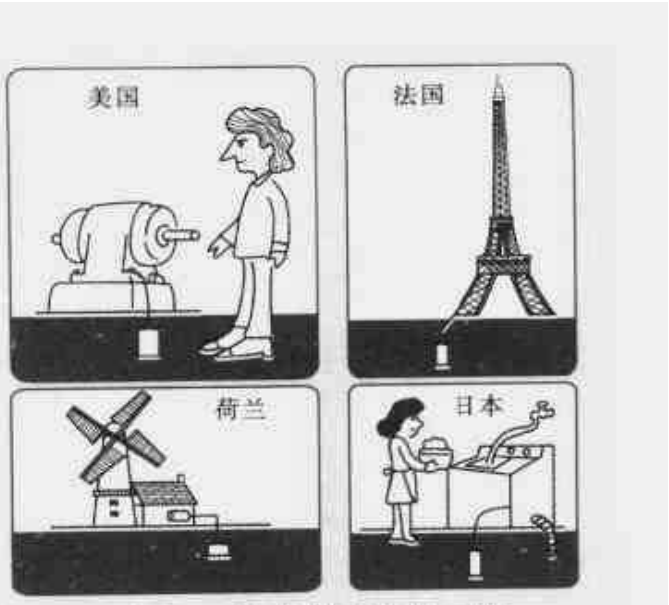


图 2　地球是电的收容所

## 接地工程的种类

接地用于各种地方，但从这点看，在称为电气设备技术标准的省令中*，根据使用目的的不同制定了表 1 中的四种类型，确定接地电阻的阻值。补充说明中给出的某种危险程度高的场合，就相当于高压以上的设备。

表 1

| 种 类 | 接地电阻阻值 | 补充说明 |
|---|---|---|
| 第一种接地工程 | 10Ω 以下 | 危险程度高的场合 |
| 第二种接地工程 | $\frac{150}{\text{高压电的 1 线的地网电流}}$ Ω 以下 | 变压器的中点接地 |
| 第三种接地工程 | 100Ω 以下 | 危险程度低的场合 |
| 特别第三种接地工程 | 10Ω 以下 | 危险程度比第三种高时超过 300V 的铁台等 |

### 关于接地工程

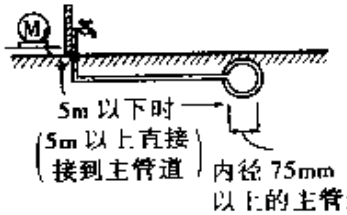
接地工程正确与否非常重要，接地电阻的测量方法请参照电量测量的 238 页的介绍。

| 接地工程的分类 | 地线的粗细 |
|---|---|
| 第一种 | 直径 2.6mm 以上 |
| 第二种 | 直径 4mm 以上 |
| 第三种<br>特别第三种 | 直径 1.6mm 以上 |

这里要记住的是作为接地线使用的导线的粗细，以及近旁的东西，即给出的能代用接地极的自来水管(金属管)的基准。

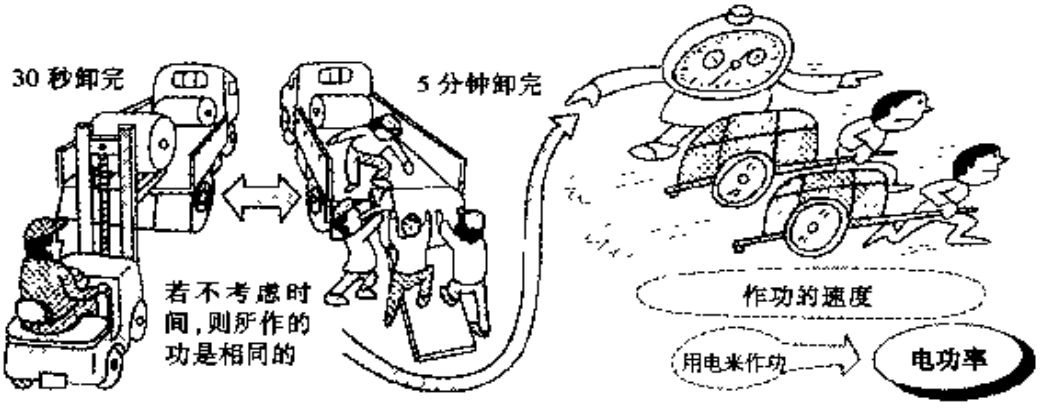
水管（金属）为 3Ω 以下时，哪种接地工程都可使用。






* 指日本内阁以政令形式发布的技术标准，相当于中国的部颁标准。——译者注

# 5 功与电功率




## 功、动力、能量

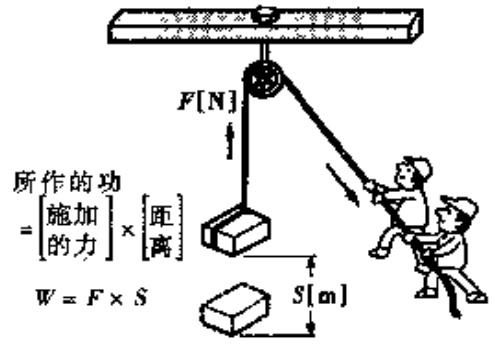


图 1

我们认为在很多情况下，所用的功，能量，动力（功率）这些术语经常混淆。

说到作功时，科学的说法应是当把一个物体从一个地方移动到另一个地方时，力对于一定距离所作的功。

如本节开头的题图所示，一边是用升降叉车移动物体，同时也用人力做与此相同的工作。若考虑所花费的时间，它们就作了相同的功。为计算所作的功 $W$[J]，若设力为 $F$[N]，距离为 $S$[m]，则 $W = FS$[J]。

另外，若考虑到所用的时间，每单位时间（每秒）作功的比率为 $P$[W]，时间为 $t$[s]，则表达式 $P = W/t$[W] 成立，其中 $P$ 称为**功率**，电学上称为**电功率**。也就是说，即使作功相同，功率（或者电功率）$P$ 表示作功的快慢的不同，也就是表示作功物体的能力。另外，对于能量来说，由于物体作功，非常重要的是它能够变为一种特殊的状态（石头落下啦……），这种能够作功的状态就说明物体具有能量。

对于电学来说，电功率的单位为瓦[特]，单位符号为 W，这与发明蒸气机的瓦特有关。在 1 伏[特]电位差下，若在 1 秒的时间移动 1 库[仑]的电荷，这时所作的功就是 1 瓦[特]的电功率。



电作功时

电子在导体内移动时，那里就有一种作功的力。这就是电源的电压产生电流流通，若此电流流过电热器的电热丝就变换为热能而作功（图 2）。另外，为了让风扇转动，以便送出冷风或热风，就需要让电动机转动，也就是要将电能变换为机械能，作机械功（图 3）。

这样，在各种电器中，电能必能变换为其它任何形式的能量而作功，当然，在作为电能而存在的期间，也可以什么功也不作。

因此，在电路中若不接入作功的装置，就可以说电还没有作功。

这里，作功的能力就是**电功率** $P$ [W]，在多长时间内使用 $P$[W]在电学上称为电能 $W$[W·s]，即 $W$[J]（图 4）。若电能较大，使用 [W·h] 或者 [kW·h]为单位。




图 2　变换为热能




图 3　变换为机械能

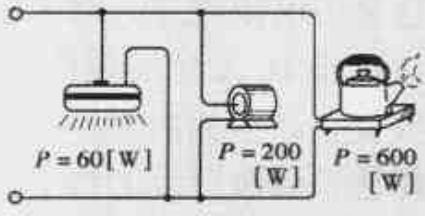



图 4　作功的物件，作功的能力 $P$[W]

Let's try

## 电器能力的比较

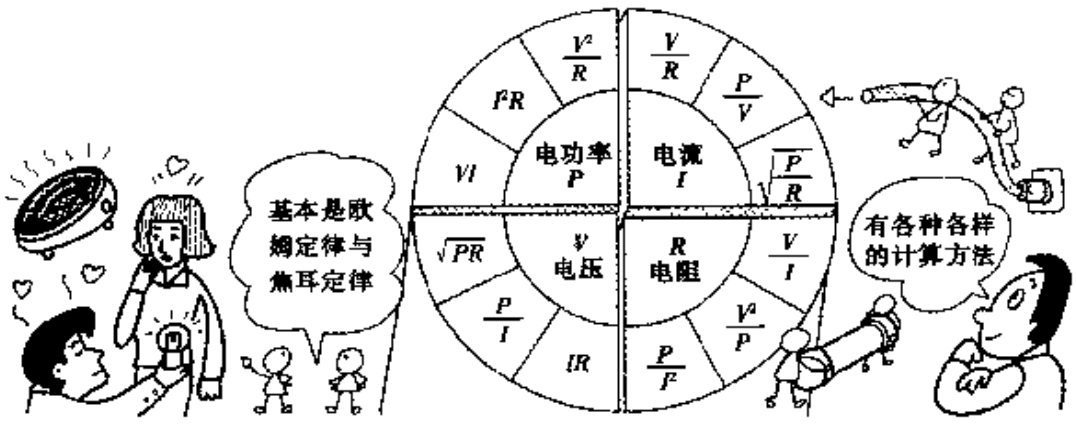


家用电器所标称的“瓦数”是表示电器用电的容量。当然，如果将瓦数乘以使用时间就是到那时为止所用的电能。

请注意节约能量。

| 品名 | 消耗功率 | 品名 | 消耗功率 |
|---|---|---|---|
| 电炉 | 0.6<br>1.2kW<br>2.0 | 电褥子 | 20<br>W<br>60 |
| 电饭煲 | 0.5<br>kW<br>1.2 | 电烤炉 | 200<br>W<br>600 |
| 烤面包机 | 400<br>W<br>600 | 电冰箱 | 100<br>W<br>500 |
| 电暖炉 | 0.5<br>1kW<br>2<br>3 | 电视机 | 50<br>W<br>200 |

# 6 焦耳定律




## 揭穿发热的奥秘

从灯座上取下正在点亮的灯泡时，灯泡为何如此热，想过这是什么原因吗？

这是因电流流过电路各要素之一的电阻而发热。在电路中，发生的热量可用“瓦”[W]来计算，但电气设备产生的热有各种类型(图 1)。

即使给活泼可爱的孩子取暖，有的人费不了多少力气，也有的人做梦都在使劲。

因此，若根据经验可知各种电器正常工作时的温度，就能判别电器运行是否正常。由图 2 试计算电功率。




图 1 电功率与热量的关系




图 2 电路实例



❶ 应用欧姆定律→计算电流

$I = V/R = 100/20 = 5$ [A]

❷ 电功率的计算→计算瓦数

$P = I \times I \times R = 5 \times 5 \times 20 = 25 \times 20 = 500$ [W]

**焦耳定律（$P = I^2R$）**

One point

单位时间内产生的热量与导体的电阻以及电流的平方成正比，这称为焦耳定律。



## 改变电功率的因素之 ❶ 电　　压

在图 2 中，试考虑如果施加在电阻上的电压增大到 2 倍，将会怎样呢？

对于在 100V 电压下，电功率为 500W 的元件来说，在 200V 电压下，电功率就变成 2kW(2000W)，使用的功率为原来的 4 倍。这是什么原因呢？按照前面得出的公式依次计算即可。

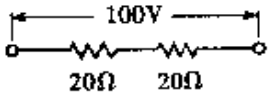
❶ $I=\frac{V}{R}=\frac{200}{20}=10$ [A]（这是其 2 倍）

❷ $P=I\times I\times R=10\times 10\times 20=2000$ [W]　　（这是其 4 倍）



## 改变电功率的因素之 ❷ 电　　阻

<串联连接>　增大电阻时

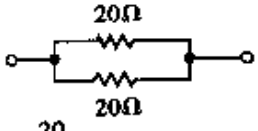



电阻增加到 2 倍为 40Ω

● 欧姆定律 $I=\frac{V}{R}=\frac{100}{40}=2.5$ [A]（$\frac{1}{2}$ 倍）

● 焦耳定律 $P=I^2R=2.5^2\times 40$
$=6.25\times 40=250$ [W]（$\frac{1}{2}$ 倍）

<并联连接>　减小电阻时




电阻为 $\frac{20}{2}=10$ [Ω]

● $I=\frac{V}{R}=\frac{100}{10}=10$ [A]（2 倍）

● $P=I^2R=10^2\times 10=1000$ [W]（2 倍）

由此可知，电功率（$P$）与电压的平方成正比，与电阻成反比（用公式 $P=V^2/R$ 表示，此公式非常重要，要经常记住它的意义）。




### 熟悉一下电阻

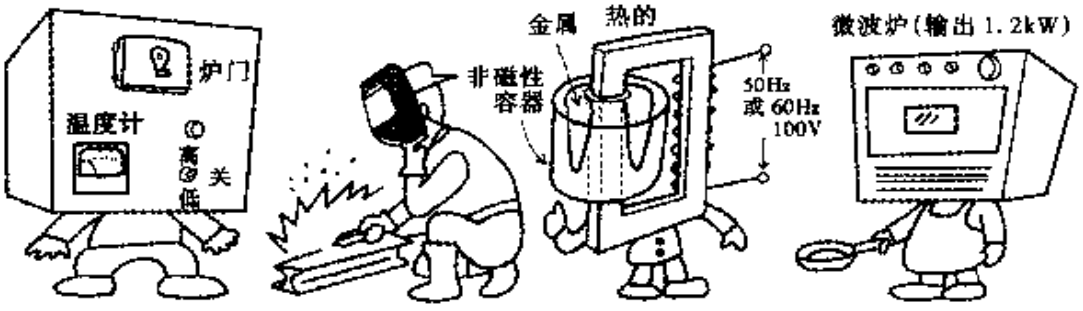
电子电路中使用的电阻除了阻值以外，还用额定功率表示。即使相同阻值的电阻，额定功率大的其形体也大。由电功率的计算公式 $P=I^2R$ 可知，相同阻值的 $R$，功率 $P$ 大的其流过的电流 $I$ 也大。于是发热量也大，形体也大。使用电阻时，通常要考虑这额定功率值，流过的电流要在规定值以内。

（JIS* 规定的额定功率值的实例）
1/8W, 1/4W, 1/2W, 1W, 2W, ……

【例题】　流过 1/4W 100Ω 实芯电阻的电流是多少？

【解】$I^2=\frac{P}{R}$　$I=\sqrt{\frac{P}{R}}=\sqrt{\frac{1/4}{100}}=\frac{1}{\sqrt{400}}=\frac{1}{20}=0.05$ [A]

# 7 电　热




电阻加热　　电弧加热　　感应加热　　介质加热

## 产生电热的各种机制

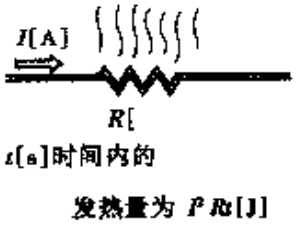



图 1　产生热量

电阻中流过电流，就产生焦耳热。这就是我们常见的事情。这时产生的热量，其关系如图 1 所示，此外，用电产生热的方法还有电弧加热、感应加热、介质加热、利用红外线加热等。

❶　电弧加热　若气体绝缘物质在电的作用下被损坏，一放电就把一部分电能变换为热能或光能。利用这时产生的非常高温就是电弧加热。

❷　感应加热　由于电磁感应的作用使电流（此时电流的方向呈漩涡状，故称为涡流）流过金属等，由此产生焦耳热就称为感应加热。本节开头的题图所画的感应加热就是把金属放入耐火容器中，使其熔化的装置。

❸　介质加热　这就是用微波炉进行烹调时的加热方法，如图 2 所示，用电极夹住绝缘物体，若施加高频电流（交流频率很高的意思），就从内部发热。这是由于其中的分子产生振动，这种加热的方法称为介质加热。

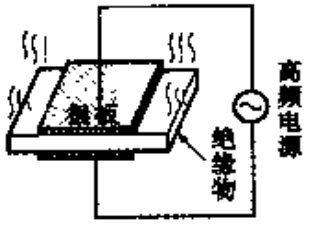



图 2　介质加热

One point　焦耳热的发热体经常使用电热器或电炉。种类有❶金属发热体，❷非金属发热体。❷用普通的镍铬合金丝，用于温度 1000℃以下，❷用烧制的碳化硅(SiC)，用于温度为 1200 ~ 1500℃的范围内。



## 我们身边的应用实例

具有艳丽七色光的彩绘景泰蓝，其精细加工时都是把优质的釉彩涂覆在铜板等之上，然后用电炉在800℃温度下烧制而成，这样就变成不可思议的美丽无比的东西。在景泰蓝上绘画的电路非常简单，如图3所示。这里开关的作用是切换电热丝，热电偶（12中介绍）检测炉内温度，这里综合了学习过的内容。

另外，图4示出微波炉的大致结构。产生高频的频率使用2450[MHz]。有关交流方面的知识将在以后介绍，但使用这一频率的原因，除了产生这样高频率的磁控管容易获得以外，还由于电波渗透到食品中的深度也较适中。

（1[MHz]为$10^6$[Hz]）

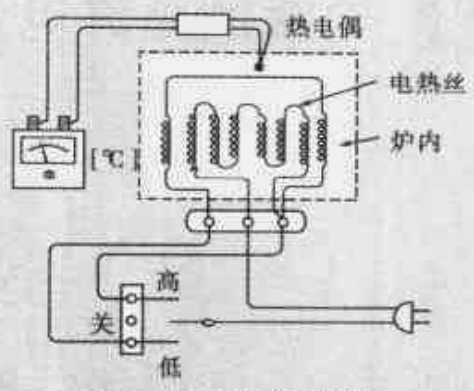


图3　景泰蓝烧制炉

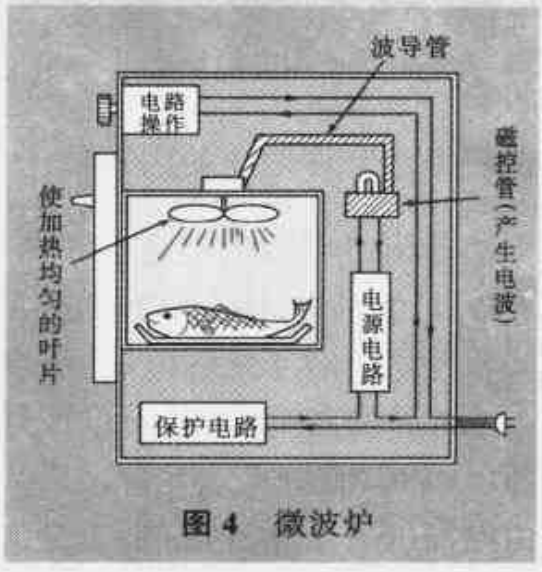


图4　微波炉

### 自制烤炉

可用电阻自制烧烤维也纳香肠的烤炉。施加交流100V的电压，应有充分保护措施，注意不要触电。另外，由于是加热，因此，请选用不易引起火灾的材料。



# 8 电线的允许电流




## 决定电线允许电流的因素

若流过电线的电流为 1[A]，由于存在电阻 $R[\Omega]$，在 $t$ 秒时间产生 $I^2Rt$[J]的热量，由于这种发热的作用，电线自身的温度要升高(图 1)。

特别是对于绝缘电线，温度一升高，绝缘就会损坏，甚至会使导体熔断。因此，绝缘电线允许的最高温度由电流的大小所决定。能安全流过电线的最大电流称为**允许电流**。

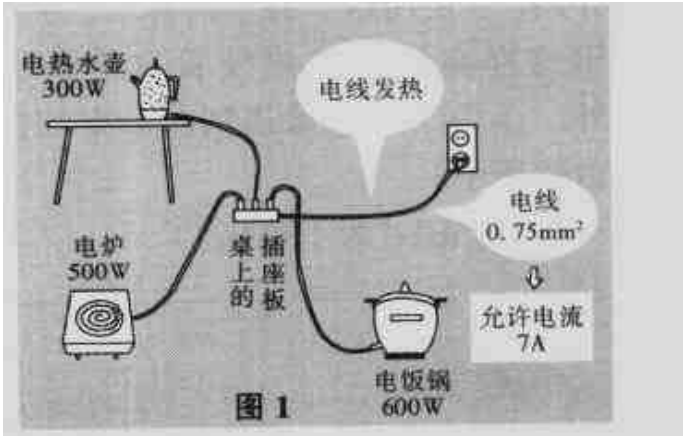


图 1

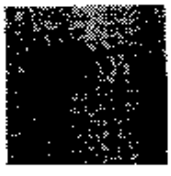
若在绝缘电线等中流过电流，则电线由于存在电阻就产生焦耳热，温度也会升高，但使用时，不得超过其温度界限，也就是说，电线的粗细决定其流过的电流。经常记住这一点即可。另外，实际上电线最高允许温度，对于 600V 乙烯树脂绝缘电线为 60℃，但由于受到周围环境的影响，也只能为 30℃。

One point

按照 600V 乙烯树脂绝缘电线的种类示出其允许电流

| 粗细 | 1.6mm | 2.0mm | 5.5mm² | 8mm² | 14mm² | 21mm² |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 允许电流[A] | 27<br>(尾数为 7) | 35<br>(7×5 的值) | 49<br>(7×7 的值) | 61<br>(6+1 为 7) | 88<br>(例外) | 115<br>(1+1+5 为 7) |

<注> 用绝缘子支撑电线时的允许电流(记住与 7 有关的数)



## 决定允许电流的要素

决定允许电流的要素是由电流引起的电线内部的发热量。这种发热量最好全部散发到外部，但实际上发热量与散热量不等，二者的差值就导致温升并达到稳定。这种温升若在允许温度以内，当然不会损坏绝缘覆盖层。

若考虑这些因素，现把决定允许电流的要素试归纳如下(图 2)：

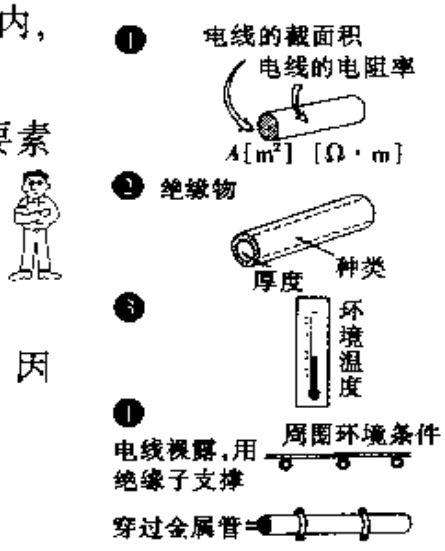



图 2

❶ 与电线的电阻的关系，即与电线的直径、电线的电阻率有关。实际上随着电线延长，电阻也增大，但电线延长散热量也增大，因此，可看作与电线长度无关。

❷ 与绝缘物的种类和厚度有关。

❸ 与环境温度有关。

❶ 与周围环境条件有关(通风好坏等)。

例如，对于室内布线工程，把乙烯树脂绝缘电线装入金属管内进行布线时，允许电流要减少 3 成，因此，有必要参照下例通过计算来确定。

【例题】 若把 1.6mm 的电线装入金属管内进行布线，流过的电流为多少?

减少率按 0.7 计算，$27 \times 0.7 = 18.9$ [A]

可见，普通的布线(1.6mm)不能用于向 2kW 的电气设备供电*。

### 对电气工程实验进行挑战!

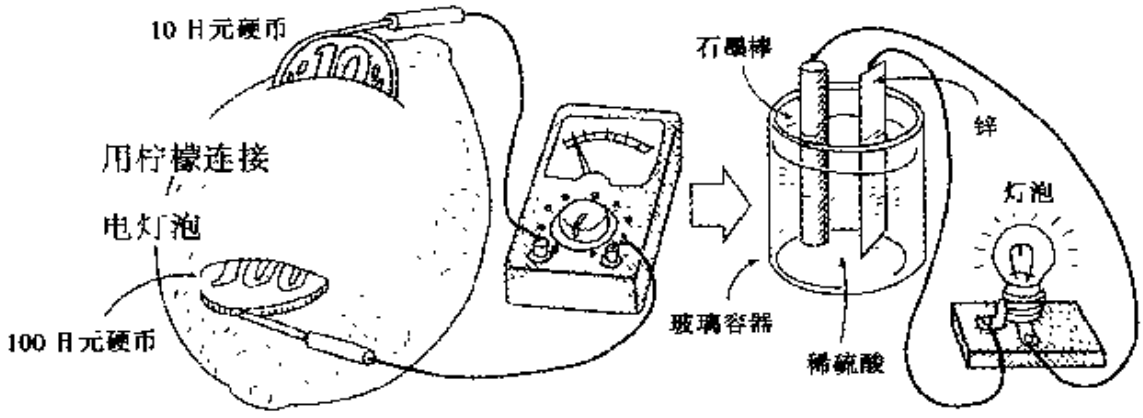
进行一般家庭室内布线工程时，必须通过电气工程师的资格测验。试回答这种测验中提出的问题。请做一下看看。

| 解答根据 A、B、C、D 进行选择 | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| ❶作为决定室内布线使用的电线的粗细的要素，其中正确的因素是 | 接地电阻<br>允许电流<br>机械强度 | 电压降<br>绝缘电阻<br>机械强度 | 电压降<br>允许电流<br>绝缘电阻 | 电压降<br>允许电流<br>机械强度 |
| ❷3 根电线装入金属管内。允许电流的减少系数为 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |

【答案】 ❶ = D ❷ = D

* 这个结论只适用于市电电压为 100V 的情况，对于 220V 的市电电压，向 2kW 的电气设备供电时，流过电线的电流只有 9.1[A]，使用线径为 1.6mm 的电线是可以的。——校者注

# 电　池




电池的实验

把柠檬皮切开两个小口，各放进 100 日元和 10 日元的硬币，若接上测量微小电流的仪表，就可知产生的电压。为了制成更好的电池，如本节开头题图所示，把石墨棒（可从旧干电池中取出）与锌板置于玻璃容器内，并浸泡在稀硫酸中即可。这时，石墨棒为正极，锌板为负极。

> One point　一般来说，所谓电池就是化学能转换为电能的装置。有关太阳能→半导体的问题参照 16。

电池产生电的机理

电池为何产生电呢？说到其机理，很多人都是一边在用电，一边在思考“电是怎么产生的呢？”。实际上学电的人要懂点“化学知识”。电池产生电也是由于**化学反应**引起的。

水（$H_2O$）同硫酸（$H_2SO_4$）混合形成**电解液**（硫酸一溶解于水，就自发地

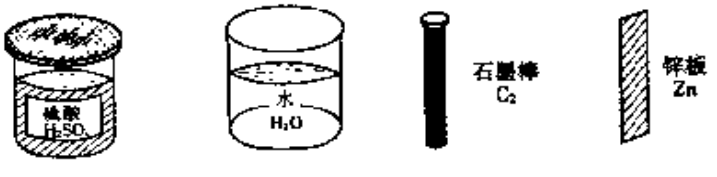



图 1　电池的材料




图 2

电离，形成含有 + 离子，－离子的液体），若电解液中放入石墨棒和锌板的电极，就起化学反应（图 1，图 2）。

也就是说，电解液的硫酸分成 + 离子（$2H^+$）和 － 离子（$SO_4^{--}$），锌板（ + 极）吸引 － 离子，与其化合形成硫酸锌（$ZnSO_4$）。石墨棒（ － 极）吸引 + 离子。这种作用产生电极间电位差。因此，锌的电极有负电子，锌变为 － 极，石墨棒变成 + 极。这种电池产生约 1.5[V]的电压。

### 干电池的构造

作为干电池的电解液，使用的是渗入固态物之中的氯化氨（$NH_4Cl$）溶液，其他的与前面介绍的一样。电流的流向与电子运动方向相反（图 3）。

碳棒（ + 极）→灯泡→锌板
↑（电解液）←

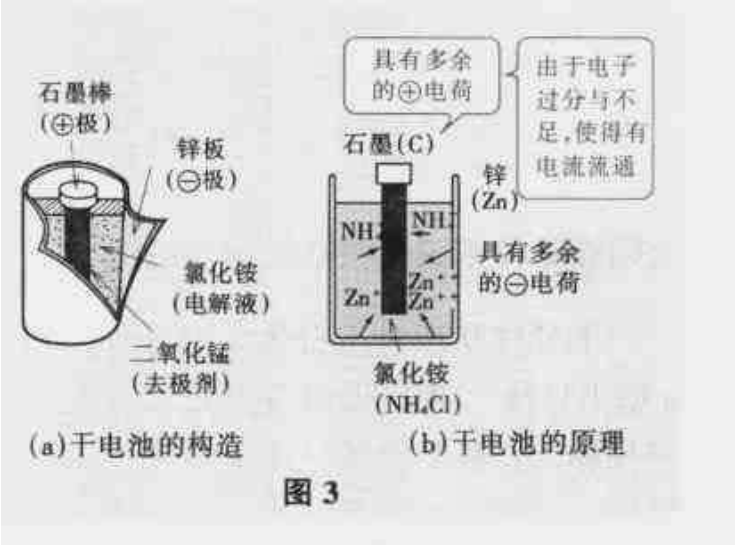


图 3

One point

对于干电池来说，由于化学反应使锌逐渐减少直到消失，放电完毕就不能再使用。这种电池称为一次性电池。

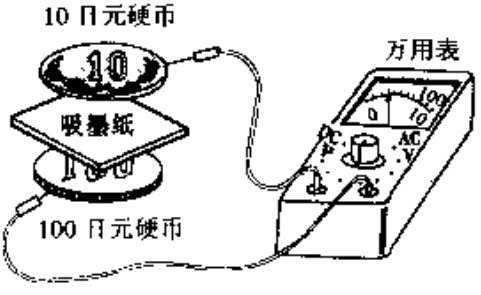
Let's try

### 真的有电流流动吗！

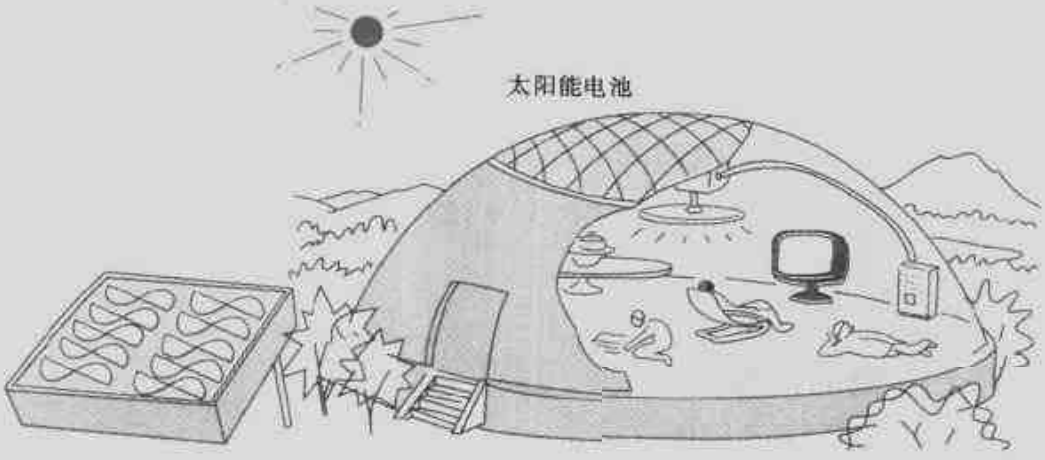


电池作用实验的一种方法如下图所示：

图中，剪下吸墨纸浸泡在食盐水中，放在 100 日元硬币和 10 日元硬币之间。若接到灵敏度高的电流表（1mA 以下），就产生微小的电压，由电流表就可确认电流的流通情况。



# 10 其他电池




## 太阳能储存系统的核心太阳能电池

半导体从原理上分为 p 型半导体和 n 型半导体。n 型半导体是负电荷多余的半导体，p 型半导体是正电荷多余的半导体。太阳能电池就是在 n 型硅半导体的表面上掺入几微米厚的 p 型半导体形成 p 型层，若光照射到上面，当然光被吸收而产生电流（图 1）。这时的电压为 0.4V，电流约为 30mA/cm²，可以像普通电池那样进行串并联，从而增大电压和电流。另外，来自太阳的能量非常大，就是说太阳在日本三天注入的能量就相当于日本一年所消耗的热能。想办法收集如此巨大能量的装置就是太阳能储存系统，其中，太阳能电池起主要作用。

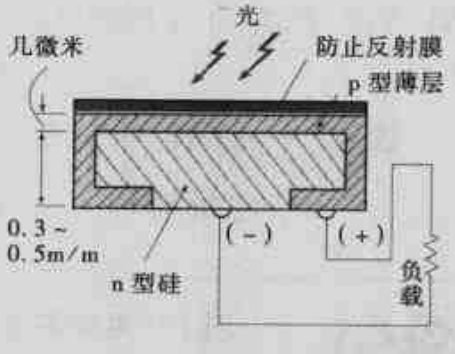



图 1　硅太阳能电池的构造

One point　太阳能电池的成本虽然很高，但实用化的计划已经提到日程上来。最近，国家(指日本国)已经为此拨出专项资金，2－3kW 太阳能电池组件已经销售到家庭。今后为了大面积推广，有必要将每 1W 的价格降低到 100 日元以下。

| 成本下降目标 | 1980 年 | 1983 年 | 1985 年 | 1990 年 | 2000 年 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 5 000 日元/W | 2 000 日元/W | 1 200 日元/W | 650 日元/W | 100 日元/W |

使用的各种电池

### ❶ 一次性电池

一次性电池有在9中已经介绍过的锰干电池，容量大的碱性干电池。按电池的大小可分为单1号，单2号，单3号等几种。

钮扣电池有图2所示的空气电池，碱性钮扣电池等。

根据不同的用途，选用干电池时还要考虑价格，这是非常重要的。

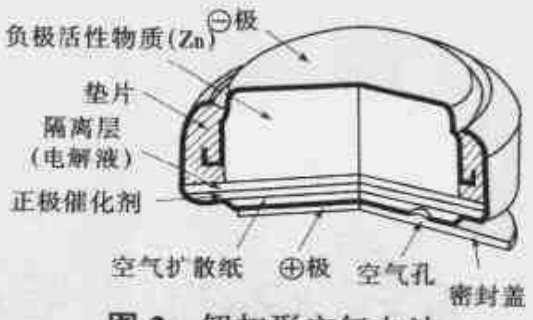


图2 钮扣形空气电池

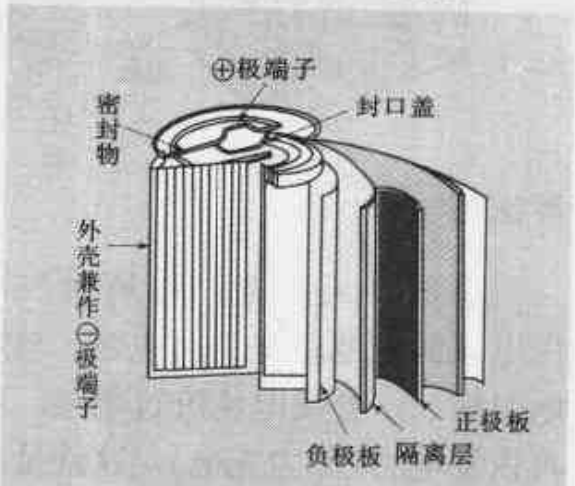


图3 镍镉电池

### ❶ 镍镉电池

这是从镍和镉而得名的所谓镍镉电池。

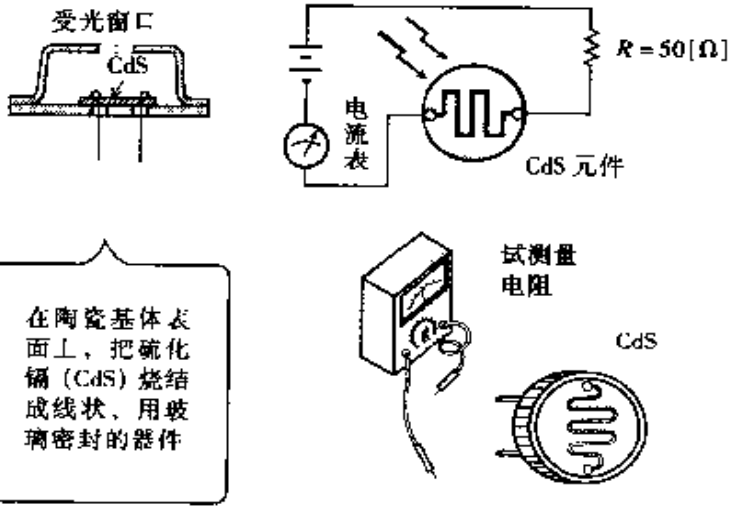
碱性蓄电池的1个电极使用镉(Cd)，像干电池那样的密封电池（图3）。电压为1.2V，小型便于携带，也可以充电。对于这种电池，如果注意及时充电，可重复使用几百次，也就是说比锰干电池更为经济。




### 试研究 CdS 光敏元件的灵敏度

用光改变电阻值从而改善导电性的元件有CdS光敏元件。它的构造与外观如右图所示，试组成电路进行实际实验。

应用此电路，若用标准照度计来校准此仪表，也可实现自制照度计。



# 11 铅蓄电池




## 蓄积化学能

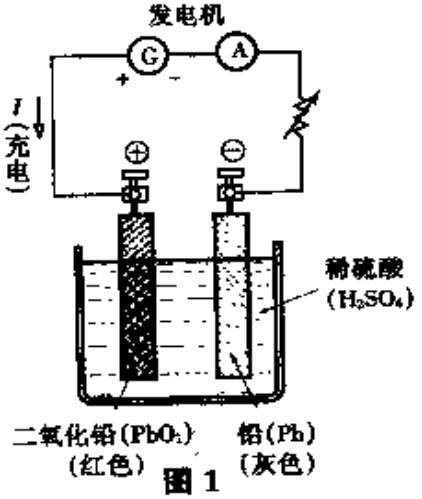
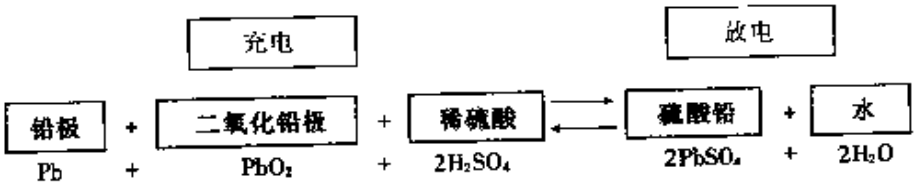


图 1

本节开头的题图中所示汽车用电源的电池就是二次电池，与用电时相反，若使电流流过电池，可再恢复电力(称为充电)。这就是所说的铅蓄电池（二次电池也包括镍镉电池)，如图 1 所示，⊕极使用二氧化铅，⊖极使用纯铅。溶液使用稀硫酸(比重为 1.2～1.3)。红色为⊕极，因此，根据电极的颜色就可知道哪个为⊕极(充电状态)。

蓄电池不仅能蓄电，也能蓄积可以转换为电能的化学能。

也就是说，为了理解蓄电池的作用，牢固地记住下述的化学反应非常重要。从蓄电池中取出电时称为**放电**。





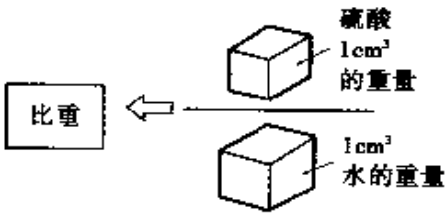

电池一放电，两个电极变成硫酸铅，稀硫酸溶液变成水。若完全充电，就变成硫酸与水的混合物，即为稀硫酸。然而，这时的比重为 1.3，或低于该值(图 2)。



www.ipc-c.com

One point

从正在充电的蓄电池中迸发出的气体为氢，因此，在电池附近不得放置火柴。




硫酸的比重为 1.8
水的比重为 1.0



图 2

## 蓄电池的容量

购买蓄电池时，起作用的是“**容量**”。就是电流持续流通的能力。

因此，说到某种汽车用电池的容量为 100[A · h]，它的内涵是这样的。

1 小时为 100A　　100 × 1 = 100 [A · h]

10 小时为 10A　　10 × 10 = 100 [A · h]

100 小时为 1A　　1 × 100 = 100 [A · h]

而实际上，容量是随着放电的时间逐渐减少的。

电池的容量与时间

容量 = 电流[A] × 时间[h]

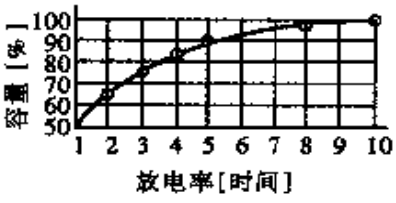



图 3

一般来说，以恒流放电，达到 10 小时的放电界限（下降到 1.8V 左右）时，称为 10 小时放电率，这是标准的放电率。

图 3 示出用其它放电率放电时容量的变化曲线。若短时间大电流放电，则放电容量就明显地减小。

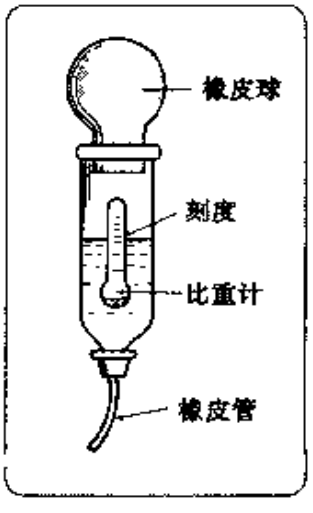
Let's try

### 测量电池溶液的比重！

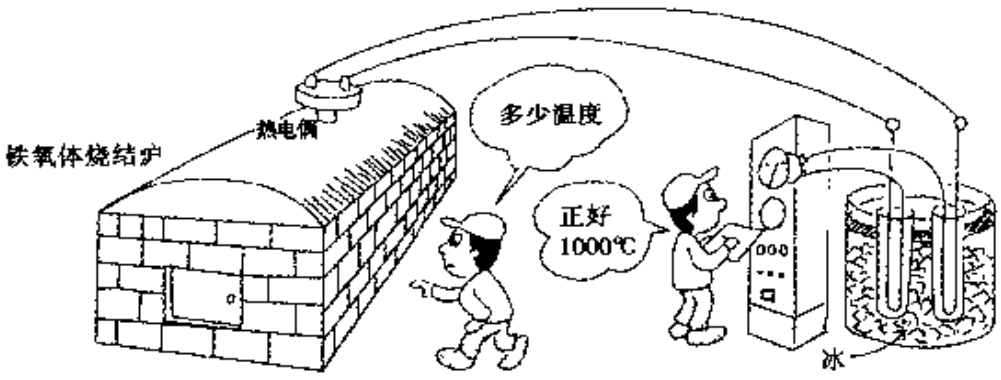
若使用比重计，就可立刻测量出电池溶液的比重。

右图是**吸液式比重计**。手握住橡皮球，把橡皮管浸在电解液中，吸上溶液，然后由比重计的刻度就可读出比重。

比重计是基于阿基米德原理。即液体中的物体排出的液体重量等于物体自身的重量。液体的比重越大，则比重计沉入液体的深度越浅。浮子沉入的深度可换算为比重，若记上刻度，就可直接读出比重。



# 12 热电动势




## 塞贝克效应

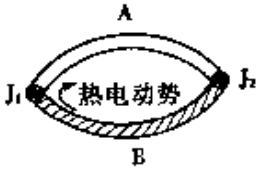



图 1　热电偶的原理

本节开头的题图示出控制电炉与电烘箱的热量，并用于测量的简单装置。这就是**热电偶**(thermocouple)，如图所示，两种不同的导体（金属或合金）其两端彼此接在一起而构成回路，若这两个接点 $J_1$，$J_2$ 具有不同的温度，回路中就流过一定方向的电流，上述装置就是利用此原理构成的。

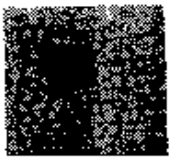
这种现象称为**塞贝克效应**，于 1882 年由德国的塞贝克发现。这时产生的电动势称为**热电动势**，回路中流过的电流称为**热电流**。这种热电动势经放大后可用于驱动大电动机、电磁阀、控制装置与记录装置。实际的热电偶采用镍－铂、铬－铝合金，铁－康铜等各种金属、合金制成。这种从未听说过的合金是为用于热电偶而特别研制开发的。下表示出理科年表等中给出的铂与其它金属类的热电动势。表中热接点为 100℃，冷接点为 0℃（＋表示图 1 中铂为 B，按箭头方向流动时的情况）。

| | |
|---|---|
| 锌 | ＋0.76mV |
| 铝 | ＋0.42mV |
| 铜 | ＋0.76mV |
| 铁 | ＋1.98mV |

| | |
|---|---|
| 镍 | －1.48mV |
| 钴 | －1.33mV |
| 康铜 | －3.51mV |
| 碳 | ＋0.70mV |

| | |
|---|---|
| 黄铜 | ＋0.60mV |
| 铋 | －7.34mV |
| 银 | ＋0.33mV |
| 铅 | ＋0.44mV |

实际上，根据使用温度的不同，用于电炉的热电偶有 1200℃ 的铬－铝热电偶(CA)，500℃ 的铁－康铜热电偶(IC)等。



## 热电偶的应用

### ❶ 热电式温度计

如本节开头的题图中示出的，第一种应用是测量温度。如图 2 所示，把热接点 $J_1$ 插入待测量温度处，另一端放入装有水和冰的保温瓶中，保持为 0[℃]，用电压表测量其热电动势。如果预先把温度与热电动势的关系画成曲线，由此在测量仪表中根据温度刻度就可直接读取温度读数。热电式温度计利用热电动势与温度上升成比例的关系，图 3 示出其一例。

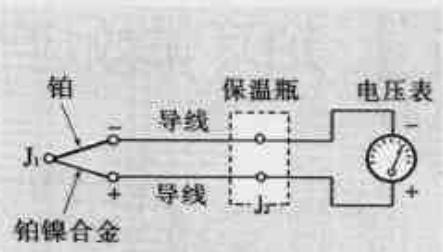


图 2 温度计

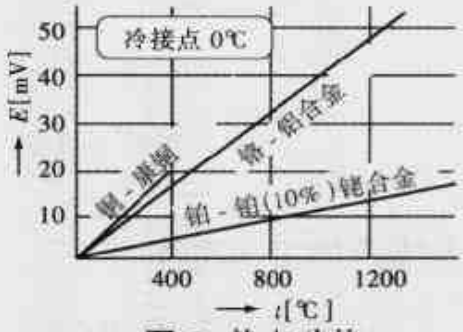


图 3 热电动势

### ❶ 热电式测量仪表

图 4 示出其一例，流过热丝加热器待测量的电流为 $I$，利用其焦耳热对热电偶 J 的接点进行加热，产生的热电动势使测量仪表的指针偏转。J 的温度设计为约 250[℃]，热电动势约为 12mV。表示这种测量仪表工作原理的符号为热电式（ ）。试与图 4 进行对比。

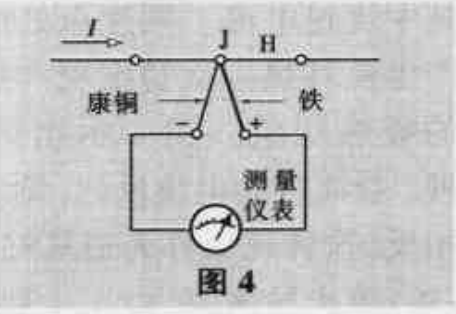


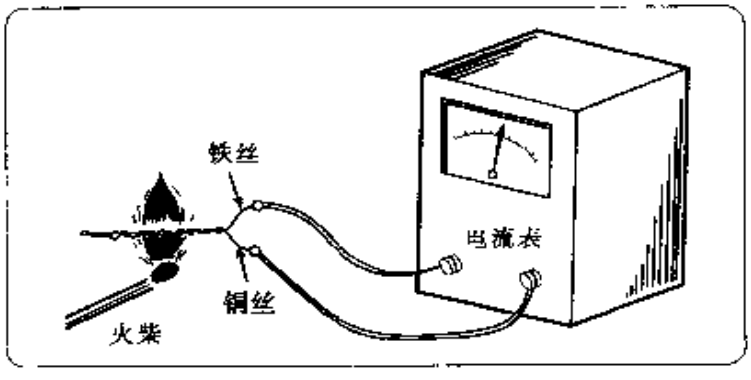
图 4



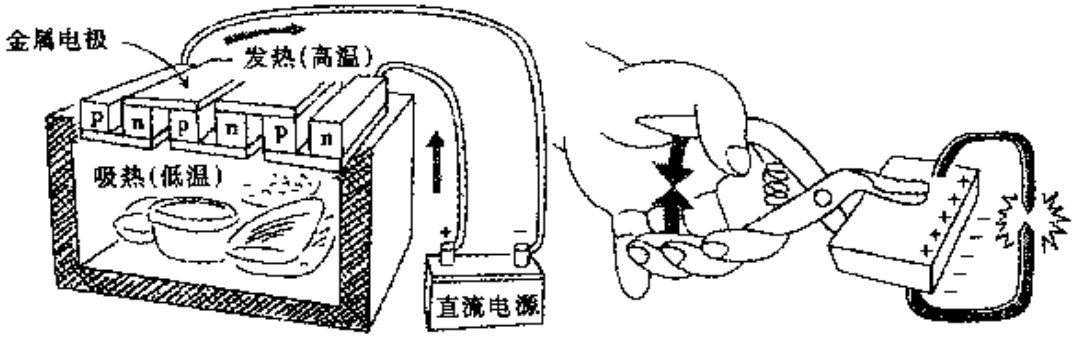
### 理解热电偶的原理

通过如右图所示方法进行简单实验就可理解热电偶的基本原理，即两种不同金属牢固地扭绞在一起，连接高灵敏度的电流表，就可测量产生的电动势。

划根火柴，使火焰位于扭绞金属线的下面，用仪表就可测量其微小电压。



# 13 珀耳帖效应与压电现象




无噪声的电子冷库

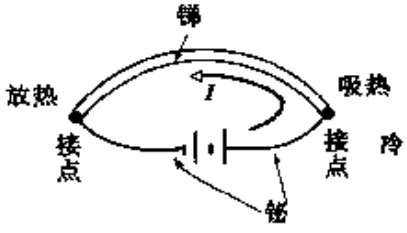



图 1 原理图

两种不同种类的金属接在一起，若其中流过电流，则接点处或有电阻处就产生焦耳热，交替出现产热和与此相反的吸热现象。图 1 示出这种状态的原理。若流过的电流反向，则产热和吸热也相反。这种现象称为**珀耳帖**效应。由图可知，珀耳帖效应大多数是产生于铋(Bi)等半导体中，由于这种发现使电致冷进入实用化。本节开头的题图示出电子冷库的原理，金属电极接 p 型半导体和 n 型半导体，若电流方向为箭头方向，则出现吸热和产热。这种半导体部分称为电极板。电极接到电极板，适当数量组合在一起并便于使用的就称为组件。

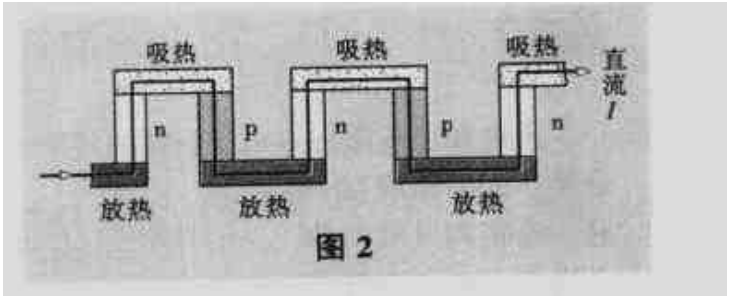



图 2

两种导体接在一起，若流过直流，根据其方向不同在导体连接部分进行如 2 所示那样的吸热与产热，普通金属的这种热量很小，可以说由于半导体材料的应用使其进入实用化。

如前所述，应用此原理的电子冷库的特征是，因无机械转动部分，所以无噪声、无振动，通过改变电流的大小，就可以在一定程度上改变冷冻效果。若电流的方向相反，则原来热处变冷，冷处变热，这又是一大特征。



## 广泛应用的压电现象

石英晶体和酒石酸钾钠等多种晶体具有特别的性质，若向晶体的表面施加电压，晶体就发生应变。反过来也正确，若从两面向晶体施加压力，则一面呈现正(+)电，另一面呈现负(-)电。这种现象称为**压电现象**。图 3 是以按照一定方向进行切割的石英晶体片来说明。图 4 示出了从两面分别施加压力和拉力时产生相反极性电荷的现象。这种现象远在 1880 年就被居里兄弟发现了。利用此现象作为气体自动点火器等的点火热源，因产生的电与压力成正比，若与波形观测器共用，也可以测量爆发力以及发动机等急剧变化的压力。频率高于可听声波的高频声波称为超声波，但也用于 10kHz～20MHz 的振荡。若所加的交流电压频率与石英晶体的固有振荡频率相同，石英晶体发生强有力的振动(即共振现象)，就产生超声波。这种石英晶体振子也称为压电元件。

磷酸钾和钛酸钡也产生压电现象。图 5 示出发生压电现象的情形。




图 3　晶体的切片

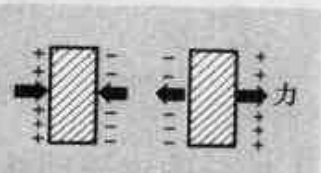



图 4　电的产生

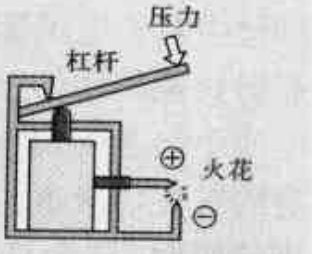


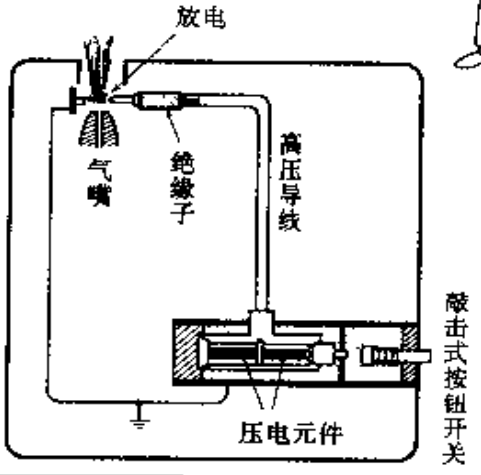

图 5　施加压力就发生压电现象

### Let's try　气体打火机的结构是怎样的呢？

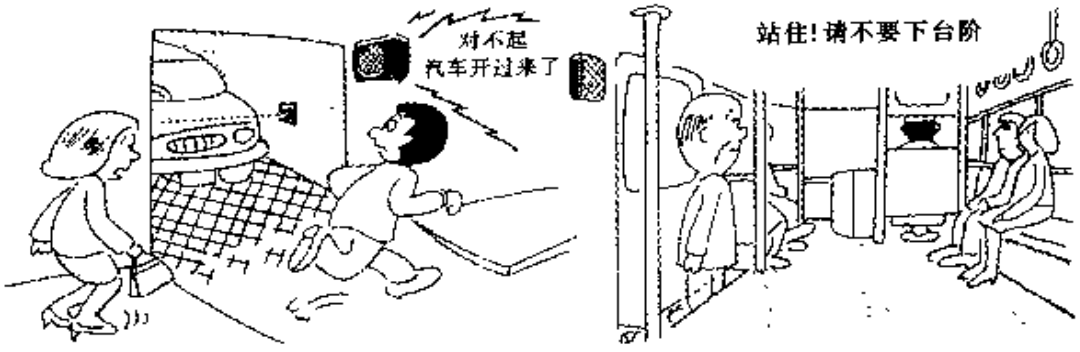


用打火机点燃香烟，以及一般燃气灶具的自动点火装置，使用的都是压电元件，作为例子示出香烟打火机的结构实例。

把两个压电元件按反极性方向装入绝缘壳体内，其两端安上盖板与压板。用敲击式按钮开关向它施加冲击力，就可输出 12kV 以上的电压。



# 14 光电转换




## 人的皮肤对光敏感

光与电是可逆的关系。即在电阻或灯泡的灯丝中若有电流流过就会发光，相反，若有光照射到某种物体上就会产生电。在10的太阳能电池中已涉及到这个问题，这里只**对光电池**本身的有关情况进行说明。如图 1 所示，若受到光的照射，则来自硒层的电子接受到光能就越出边界层，在基极和前端的透明电极之间形成电位差。电子不能返回到硒层。这是由于边界层仅单方向导电的缘故。光就这样产生电。其缺点是价格高，一个单元最高只能产生约 0.5V 的电压。

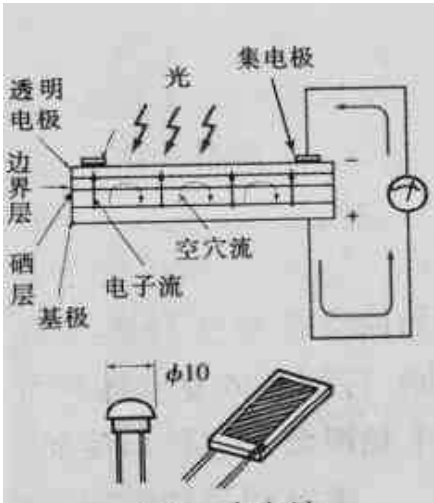


图 1 光电池

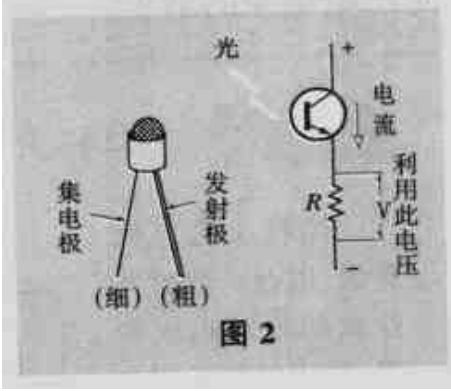


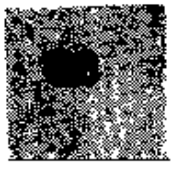
图 2

能把光转换为电的其它元件有：

❶ CdS(硫化镉元件) 这是在10的"let's try"中介绍过的元件，通过光来改变电阻。应用范围比较广。

❷ **光电晶体管** 这种器件如图 2 所示，在对应于普通晶体管基极的相应位置是受光口，按照不同的光通量来改变集电极电流。

CdS 元件和光电晶体管应用非常广泛。普通的光电晶体管的前面是玻璃或透明的塑料透镜，具有一定的方向性，而且可使用到较高频率。CdS 元件没有极性，也可以用于交流电，它是通过一种光来改变阻值的电阻器那



样的元件，价格低而且灵敏度也高，但从工作原理上看，电阻体内部必须全部受光，因此，需要有一定的面积，不能小型化。

### 旧的新的都是同一种器件

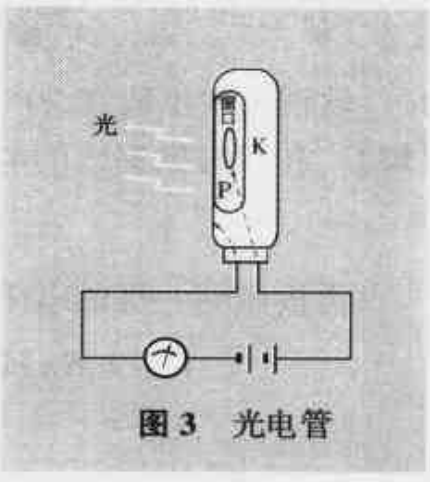


图 3　光电管

利用光电效应的例子很多，例如：人一走近就自动打开的自动门，卫生间里的自动热风吹干器，公共汽车的下车处一有人，司机就知道的装置等，这都是利用**光电效应**（一受光就射出电子的现象）。这是因为光具有能量，使物质中的电子发射出来。这时的电子特称为**光电子**。利用此现象的有**光电管**以及电视机的摄像管（最近的录像机使用 CCD* 摄像管）。

图 3 示出光电管的原理。玻璃管的内壁涂有 Cs（铯）等光电物质，留有窗口。若有光从窗口进入，就从 Cs 面发射光电子，射到接电池正极的阳极 P。Cs 面 K 为阴极，借助于电池就有电流流通。由此光就变为电流。

这里，只要受到光的照射就发射电子，这种产生光电子的现象称为光电效应，它要求光具有足以把电子轰击出来的能量。

光能的最小单位称为**光子**，其能量的大小为光子能量 $= h\nu$[J]。

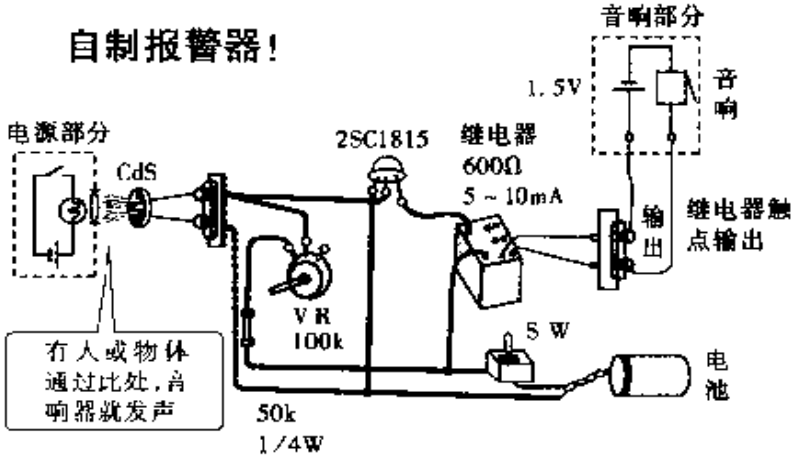
式中，$h$ 为普朗克常数，为 $6.62517 \times 10^{-34}$，$\nu$ 为光的频率，频率越高（波长短，靠近紫外线），光子能量也就越大。

Let's try

### 自制报警器！

试用 CdS 元件和继电器（在第 3 章的 9 中介绍）制作来客报知音响器或报警器。

若光被遮挡，继电器就动作。




* CCD 是 Charge Coupled Device（电荷耦合器件）的缩写。——校者



# 本章小结



**1.** 软铜线的电阻在20℃时为15Ω，温度升高到60℃时，电阻是多少[Ω]？

【解】 20℃时软铜线的电阻温度系数可由图2求出。

$$\alpha_{20} = \square$$

再按照同一页的电阻计算公式，代入数值即可。

$$R_{60} = R_{20}\{1 + \alpha_{20}(t_2 - t_1)\}$$

$$= \square$$

$$= \square$$



**2.** 正如有电流流通就作功那样，人也要吃饭，它变换为运动与热量。1kW·h的电能变为860kcal的热量。每天从食物中摄取2000[kcal]热量的人，每小时消耗97W能量，请进行计算(计算公式为860∶2000 = 1∶24P)。

**3.** 用电安全是第一位的。正是为了安全，才有各种有效的动作。

关于安全的问题在3和4都介绍过，但人触电，是因为电流通过人体的缘故。这个量到底有多大呢?记住此量也非常重要，请看下表:



| 电流值 [mA] | 影响 |
|---|---|
| 1 以下 | 有电冲击和麻木感 |
| 5 | 疼痛感，留有酸疼后遗症 |
| 10 | 疼痛难以忍受，电流流入处有外伤 |
| 20 | 肌肉收缩，抽筋，不能自制 |
| 50 | 停止呼吸，心脏功能立即停止 |

那么，手脚用水浸湿等有什么不同呢?直流为100V，交流为40V是大致的安全界限。使用时要经常注意，不能掉以轻心。

(第1道题的答案) $\alpha_{20} = 0.00393$

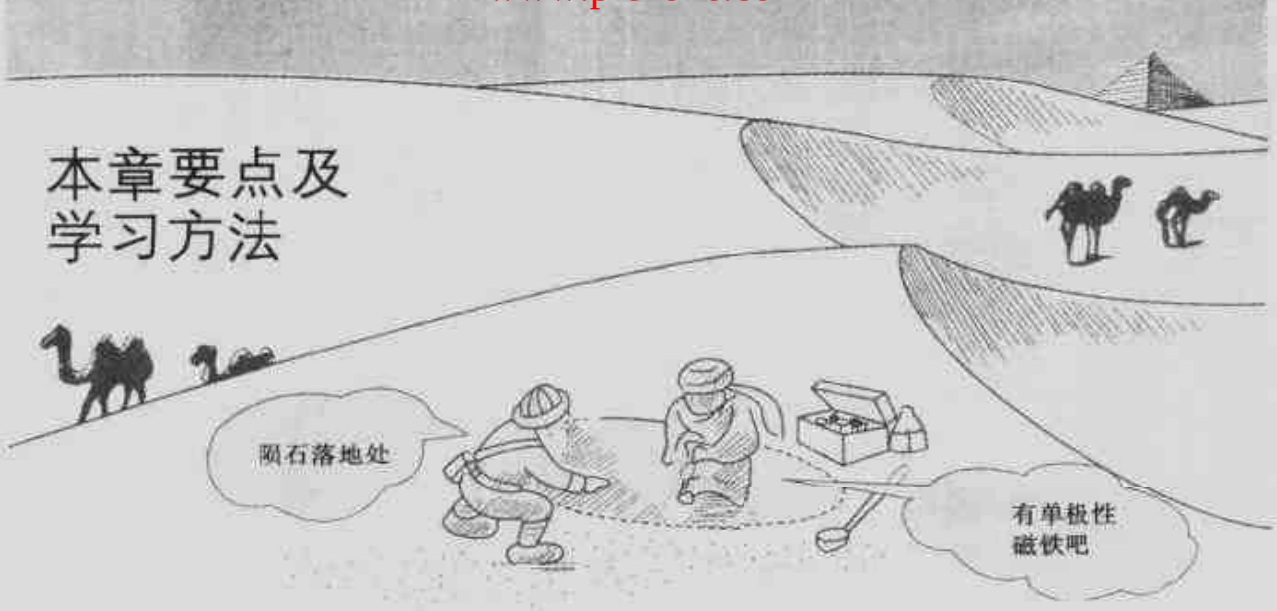
$$R_{60} = 15 \times (1 + 0.00393 \times 40) = 15 \times 1.1572 \approx 17.36[\Omega]$$



# 3 磁作用


19世纪80年代的中央电报局的电报室
实用化的电信网络
双路高速通信装置室
在法国诺尔迪铁路理事会上的铁路电信
19世纪末斯德哥尔摩的电话交换局

# 本章要点及学习方法

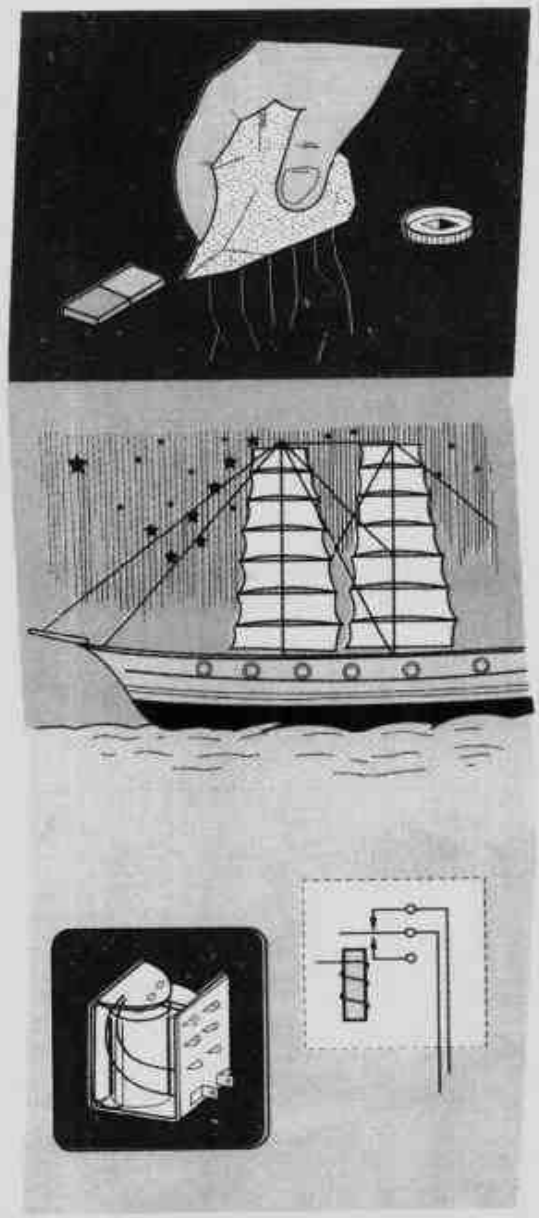



已经过了多少世纪，但磁的秘密一直没有被揭穿。古代，中国的船员们用绳系上一块特别的石头，看到它总是指向北方。这就是铁矿石。希腊人把它叫做磁铁矿。自从船员们把这种石头用于航海以后就起名为天然磁铁。

今天，磁铁吸引铁等已是众所周知，磁铁不只是天然存在，也可以在实验室里制造出来。即使用同样方法把物质变成磁铁，也有容易和不容易被磁化的物质。而最基本的是吸引铁等的力在磁铁的两端最强。这两端就是众所周知的两个磁极，即 N 极和 S 极。然而，有的科学家进行了试验，试图把 N 极和 S 极单独分离出来，但一直无法实现，也就是说关于磁铁的神秘性一直延续到现在。

本章，根据磁铁的构成，试初步研究它的性质。

再根据制作磁铁的过程来阐明电与磁之间的关系，试与电路相对应，研究磁路的欧姆定律。

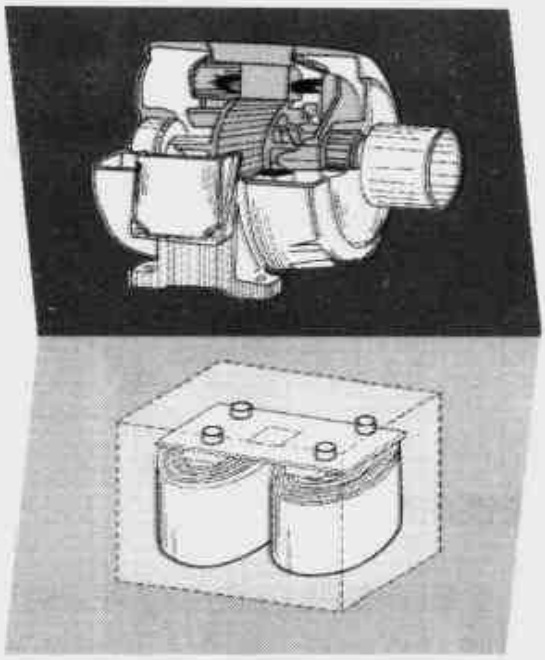




这样的类似性不仅形式上类似，而且相互有联系，电能可以转换为其它形式的能量，当然也可以进行相反的转换。

本章将讨论磁性的基本性质以及发现这些性质的科学家所揭示的定律，介绍在日常生活中利用磁性的电动机、发电机、变压器、过流断路器、电磁铁、继电器等多种应用。

这些都只是人们日常生活中司空见惯的东西。



## 本章要学习的内容

把磁作为媒介，跟使用电一样。讨论电磁感应的原理及其应用。

小磁铁就是铁中含有的无数块磁石，大磁铁则是整个地球。据此要了解磁铁具有哪些性质。




应用磁力的基本定律就是有关电磁力的问题。这里将阐明关于电磁铁和电动机的基本原理。



在实际应用中，电流与磁既可分也不可分。为了研究与电路的相似性，要了解磁的各种基本参数。

# 1 磁　铁




## 磁铁的性质

磁铁能吸引铁与镍等，而且，磁铁彼此之间既具有相斥，又具有相吸的性质。这种性质叫做**磁性**，其作用叫做**磁作用**。

磁铁除了天然磁铁的磁铁矿（具有 $Fe_3O_4$ 分子结构的铁的氧化物）以外，还有人造的永久磁铁，常见的永久磁铁有条形磁铁与 U 形磁铁等。如图 1 所示，若在条形磁铁上撒上铁屑，铁屑就集中在条形磁铁的两端，中间附近没有铁屑。这就表明磁性最强的部分是在磁铁两端附近，这两端称为**磁极**。另外，如图 2 所示，若用线绳把条形磁铁悬挂起来，使它能在水平面上自由转动，静止时它的一端总是指向地球的北极方向，另一端指向地球的南极方向。指向北极方向的磁极称为 **N 极或者正极**，而指向南极方向的磁极称为 **S 极或负极**。

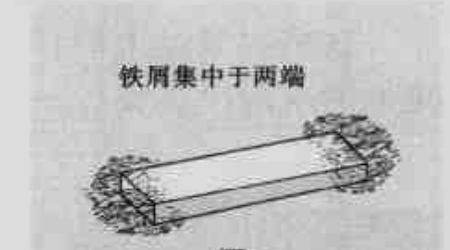


图 1

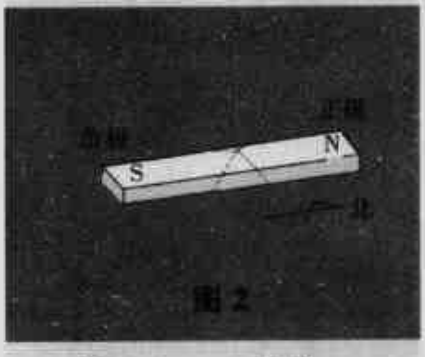


图 2

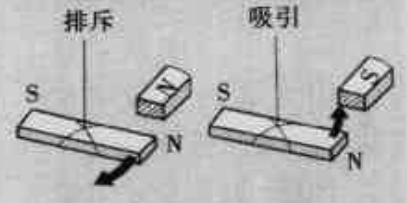
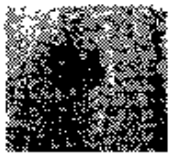


图 3

如图 3 所示，用线绳悬挂起来的条形磁铁的 N 极接近其它磁铁的 N 极时，条形磁铁就被拒斥，一接近 S 极，就吸引在一起。这说明：同性磁极相斥，异性磁极相吸。

由此可知，在我们身边这样利用磁铁是普通的事情，但若细想起来，还有各种应用。对于后来制造的**电磁铁**，一切断电流就失去了磁性，但对于条形磁铁与 U 形磁铁，它是本身具有磁性的永久磁铁。



## 磁铁为什么能吸引铁

铁与镍是易被磁化的金属，这类金属分子是由非常微小的磁铁组成。称为**分子磁铁**或**磁性分子**，磁铁可以被分解为众多的被称为**磁畴**的磁性单元。

为了便于理解，若用微小的磁铁表示一个磁畴，则如图 4 所示，铁片不接近磁铁时，铁片中小磁铁的排列如图 5(a)所示。各磁畴中小磁铁的方向是杂乱无章的，磁性被中和了，作为铁片整体没有显示出磁性。若其两端接近磁铁，则各磁畴中的小磁铁变成图 5(b) 所示那样，小磁铁沿外磁场方向整齐排列，铁片的两端呈现 N 和 S 极。这样，若从外部对铁片施加磁性，铁片就被磁化成为磁铁，由于与外部磁铁的吸引作用而相吸。

另外，这时即使拿走靠近铁片两端的磁铁，如果各磁畴的排列整齐，这铁片就被磁化，变成了永久磁铁。

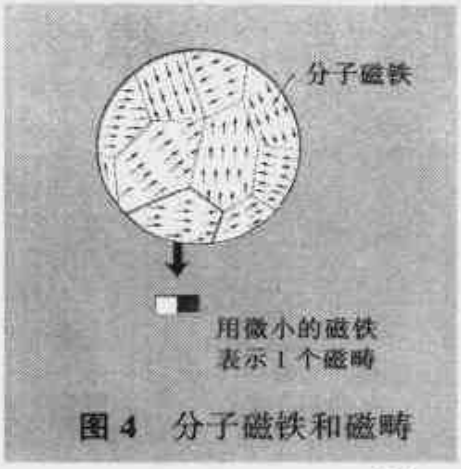


图 4　分子磁铁和磁畴

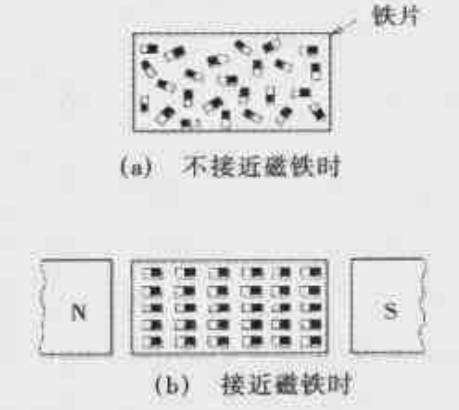


图 5

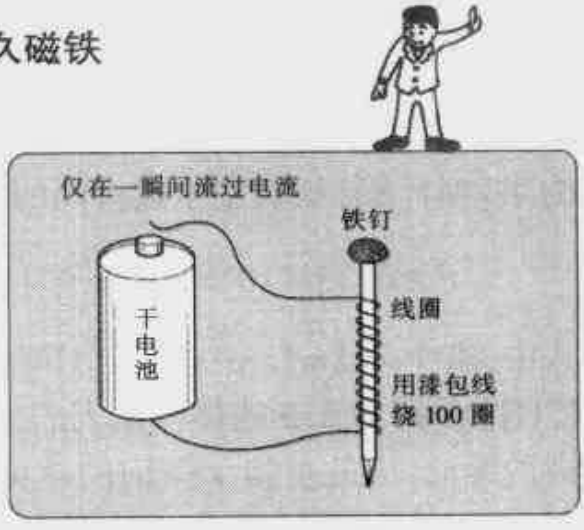
以上考虑的是铁的磁性分子在磁铁的诱导下所呈现的各种姿态。

Let's try

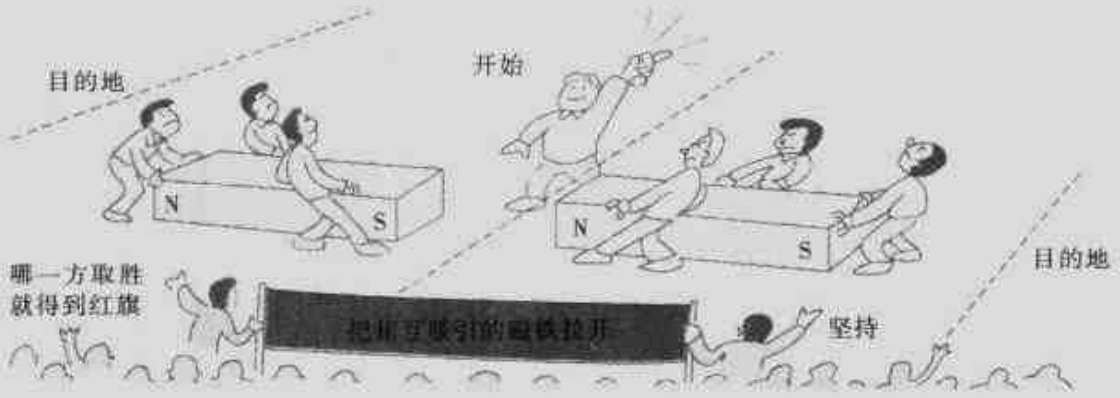
### 制作永久磁铁

用一块磁铁摩擦铁钉，铁钉被磁化就变成了磁铁，但磁性非常弱。制造永久磁铁不能使用这种方法，大部分都是使用如下的方法：即在磁性材料(铁氧体等)上卷绕线圈，瞬间通以较大电流，利用作为电磁铁时剩余的较强磁性而制成。

简单实例如右图所示，试将铁钉磁化。



## 2 库仑定律




**磁极间的作用力——库仑定律**

两块磁铁一接近就互相吸引，或互相排斥，但随着接近距离的远近不同，其作用力变化也很大。“两个磁极间的吸力或斥力与两个磁极的强度积成正比，与两个磁极间距离的平方成反比”。这是 1875 年法国科学家库仑从多次实验结果中发现的规律，称为**关于磁的库仑定律**。

如图 1 所示，条形磁铁的 N 极和 S 极相对时，若两个磁极的强度分别为 $m_1$ 和 $m_2$，二者之间的距离为 $r$，则其间的吸力 $F$ 为：

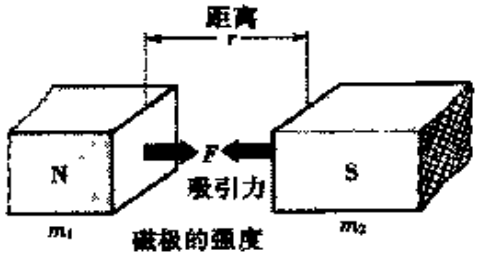



图 1

$$F = k\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

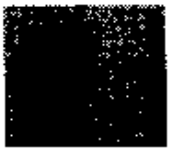


式中，$k$ 为比例常数，随磁极间的空间物质不同而异。磁极强度 $m_1$ 和 $m_2$ 也称为**磁荷**，单位是韦[伯][Wb]。若距离 $r$ 为米[m]，磁极间作用力 $F$ 为牛[顿][N]，则真空中磁极间的作用力 $F$ 为：

$$F = 6.33 \times 10^4 \times \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}\ [\mathrm{N}]$$

上式中，若 $r = 1$[m]，$m_1 = m_2 = 1$[Wb]，则 $F = 6.33 \times 10^4$ [N]。所谓 $6.33 \times 10^4$ [N] 是约为 6.5 吨那样强大的力，形成如此强大的力是由于有 1[Wb] 磁极的缘故，由此可知 1[Wb]的单位非常大。

【例】 空气中，若 $6 \times 10^{-5}$ [Wb] 的 N 极和 $4 \times 10^{-3}$ [Wb] 的 S 极相距



10[cm]放置，两者之间有多大的吸力呢?

【解】 使用上页的公式，$m_1 = 6 \times 10^{-5}$[Wb]，$m_2 = 4 \times 10^{-3}$[Wb]，$r = 10 \times 10^{-2}$[m]

$$\therefore\ f = 6.33 \times 10^4 \times \frac{6 \times 10^{-5} \times 4 \times 10^{-3}}{(10 \times 10^{-2})^2} = \frac{6.33 \times 6 \times 4 \times 10^{-4}}{10^2 \times 10^{-4}} \approx 1.52\ [\mathrm{N}]$$

### 磁场内力之间的关系

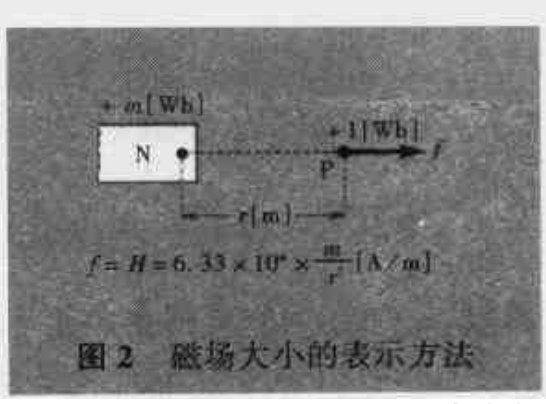


图 2　磁场大小的表示方法

两块磁铁间的作用力称为磁力，在磁铁周围存在这种磁力的作用。即，若把小磁铁或铁片靠近磁铁，由于力的作用小磁铁或铁片就被排斥，或被吸引。然而，如后面介绍的那样，整个地球看成一块磁铁，磁针指向一定方向，这样磁铁即使离得很远也存在磁力，因此，涉及到磁力作用的空间从现在起用**磁场**的术语来加以定义。

另外，为了表示磁场的状态，用**磁场的大小**和**方向**来表示。磁场的大小就是在磁场中放置单位正磁极（+1Wb）时，对其作用的磁力的大小，这可用上述的库仑定律如图 2 那样求得。

磁场方向就是对这个点磁极作用力的方向，在图 2 的情况下就是箭头的方向。

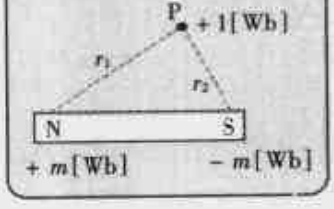
若已知磁场的大小为 H[A/m]，在其磁场中放置 $m$[Wb]的点磁极，其作用力 $f$[N]可由公式 $f = mH$ 求得。

Let's try

**试求磁场强度**

磁场具有大小和方向，因此，作为矢量进行处理。这两者合二为一也称为磁场的强度。试求右图情况下的磁场强

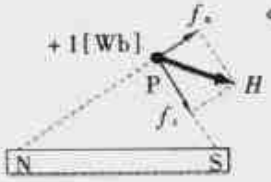
如下图那样，试求离开条形磁铁的 N 和 S 磁极的 P 点处的磁场强度。






【解】






N 引起的斥力 $f_n$ ┐
S 引起的吸力 $f_s$ ┘ 的矢量和为 $H$。

# 3 磁力线和磁通量




**类似于慧眼，它能看到用眼睛看不见的东西**

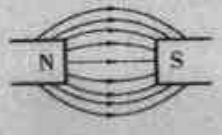
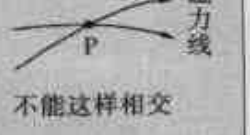
如果生命和地球都是由神仙缔造的话，那么，这位神仙就该完全能知道它所缔造的东西。

这样，根据这种现象也能知道磁力的存在。表现磁力作用的具体参量可认为是一种假想的**磁力线**。如本节开头的题图那样，在厚纸上撒些铁屑，厚纸下面放置一个磁铁，若敲打厚纸的一端，铁屑就排成美丽的曲线状图案。由此，至少可用眼睛真的看到假想的线。

据宗教称，用慧眼可看到事物的本来面目。这里即使没有铁屑，也能发现磁力线的作用与性质，由此了解磁场的状态，这也是非常重要的。首先是关于磁力线的数目与磁场强度之间的关系，规定**每 $1m^2$ 面积上的磁力线的数目为 $H$[根]时，磁场强度就是 $H$[A/m]**。

例如，某磁场内放置 $2\times10^{-6}$[Wb]的点磁极，若作用力为 $10^{-3}$[N]，根据 $f=mH$ 的关系，磁场强度为 $H=10^{-3}/2\times10^{-6}=500$ [A/m]，即每 1[$m^2$]面积上通过的磁力线为 500 根。

此外，还有如下性质：

| ❶ 磁力线总是从N极出发，终止于S极。 | ❷ 磁力线具有张力，同极性的磁力线彼此相斥。 | ❸ 磁力线的切线方向表示该点的磁场方向。 | ❹ 磁力线不交叉，在同一点磁场方向只有一个。 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |

从上页图中可以看到，磁力线都集中于在磁极，在磁极附近磁力线最稠密，远处较稀疏。这种关系表明磁场强度 $H$ 随着离开磁极距离的增加而变弱。若观察磁力线，就能了解磁场强度的分布以及磁场的方向。由此也能理解上述的规定。

**更进一步规定→磁通量**

若要说出从 $m$[Wb] 的磁极发出多少根磁力线，则由表示相对于周围物质的磁性质 $\mu$(导磁率)，就可知道其值为 $m/\mu$[根]。

由上式可知，磁力线的数目是从相同强度的磁极出来，也随 $\mu$ 值不同而改变。所以，从 $m$[Wb]磁极发出 $m/\mu$[根]磁力线称为**磁通量**。这时单位也是[Wb]。

另外，如图 1 所示，通过与磁场方向垂直的 1[$m^2$ ] 面积的磁力线总数称为这点的**磁感应强度**，用 $B$[T(特[斯拉])或者 Wb/$m^2$ ]表示。

关于磁通量也可以参照产生磁力线的想法来处理。若使用磁通量的概念，则量的处理更为合理。

根据上述规定 (磁通量是磁力线的 $\mu$ 倍)，关于磁通密度 $B=\mu H$ 这个重要关系式也成立。

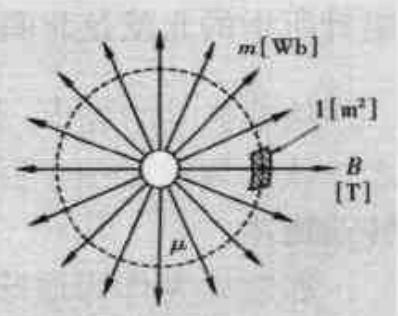


图 1　磁通与磁通密度



**记住导磁率的值！**



根据实验与理论研究，真空的导磁率为下述形式：

物质的导磁率就是产生的磁感应强度与磁场强度之比率($\mu=B/H$)。

这里物质在真空中的导磁率特设为 $\mu_0$。真空的导磁率 $\mu_0$ 表示如下：

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ [\mathrm{H/m}]$$

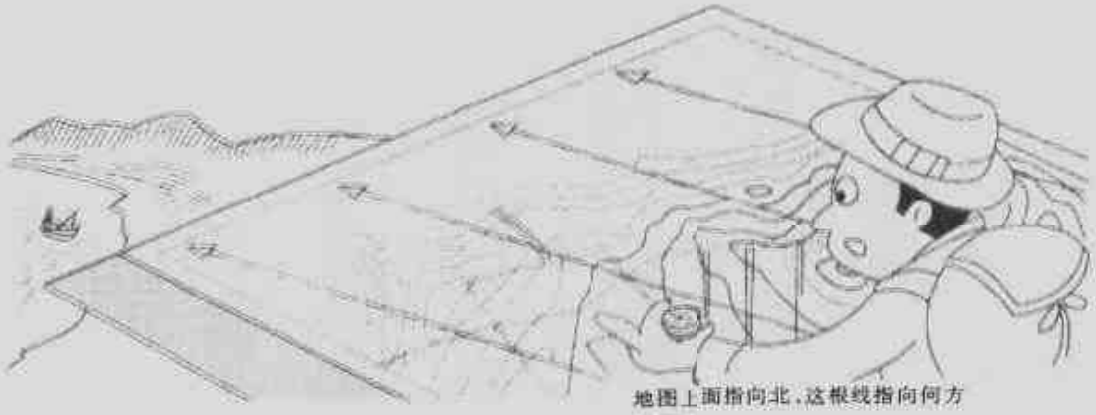
另外，一般的导磁率 $\mu$ 与真空的导磁率 $\mu_0$ 之比称为相对导磁率：

$$\mu/\mu_0 = \mu_s \qquad \therefore \mu = \mu_0\mu_s$$

主要物质的相对导磁率如下表所示：

| 物质 | $\mu_s$ | 物质 | $\mu_s$ |
|---|---|---|---|
| 空气 | 1.000 000 365 | 硅钢片 | $10^3$ |
| 铝 | 1.000 214 | 坡莫合金 | $10^4$ |

# 4 地　磁



地图上面指向北，这根线指向何方

**磁针所指的北就是北吗？**

随着科学的进步，又有新的发现，其中之一认为地球是一个巨大的像磁铁那样的转动物体。

那时认为作为地球磁铁的磁极接近地理上的北极与南极。所以，磁针指北时，假定其方向就是磁体的 N 极。然而，正如在1中已说明的那样，同性磁极相斥，异性磁极相吸，因此，磁针的 N 极当然为地球磁铁的 S 极所吸引。所以，如图 1 所示，地球磁铁的 S 极就接近地理上的 N(北极)。

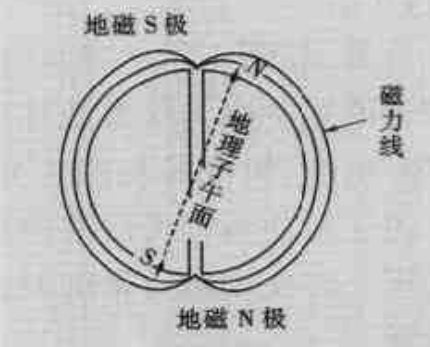



图 1　地球上的磁极

磁针常指北，但磁针所示方向是作为地球磁铁的 S 极，而且与地理的北极也不一致。

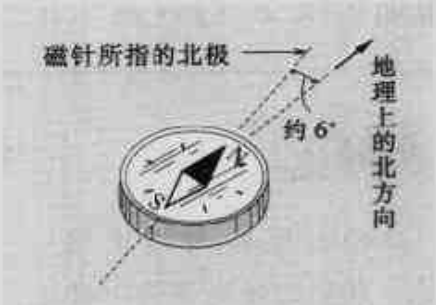
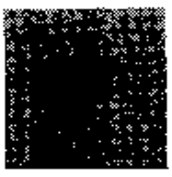



图 2　正北方向

这里，磁针所示方向与地理上的北方向之间的夹角称为“**磁偏角**”。

因有这个磁偏角，在地球上各处用磁针来寻找北的方向时，必须要对该磁偏角进行校正。日本国磁偏角如图 2 所示，为西偏 5°～10°。东京磁偏角约为 6°，因此，为了进行校正，从磁针所指的北的方向偏向东方约 6 度就是正北方向。



## 地磁的三要素

英国的威廉·吉尔伯特明确地指出地球是一块大磁铁，在1600年，他在北半球的海上航行，发现磁针倾斜。

这样，在地球上磁针从水平方向倾斜某个角度，静止时这个角度称为在此处的**地磁倾角**。

另外，为了表示某处的地磁状态，很多情况下，是水平方向的磁场强度带来问题，因此，取水平方向的分力，这称为此处的**水平分力**。这样，通过对地磁进行详细研究，这两个量加上前面所说的**磁偏角**，这三个量就是地磁的三要素(图3)。

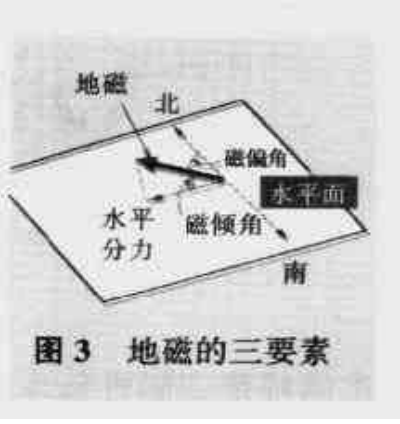


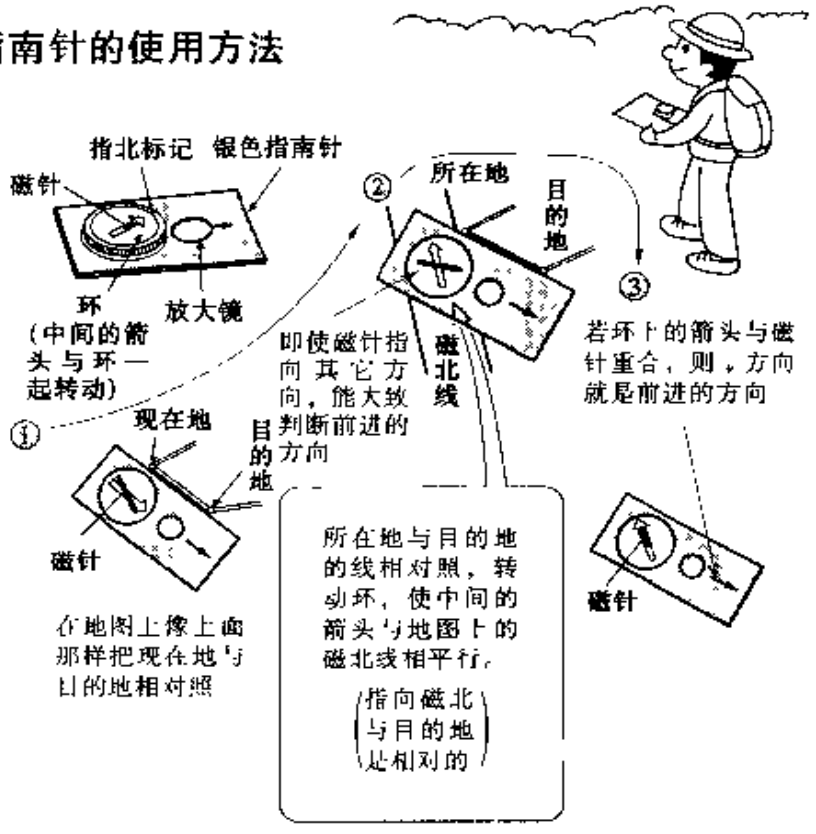
图3　地磁的三要素

One point　在各个不同地点的地磁不是一成不变的，除了1年或1个月周期性地连续的少许变化外，太阳黑子以及空中雷电引起的**磁暴**可能持续几小时，对无线通信会造成恶劣的影响。

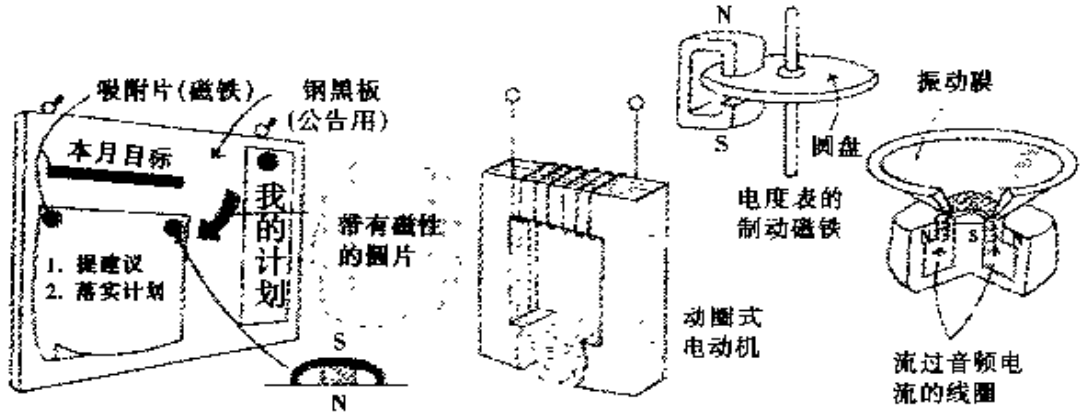
Let's try

### 银色指南针的使用方法

依靠地图与指南针就可奔走于山野间进行越野识途比赛吗？按照地图从驻地向目的地行进时，用银色指南针就能确定前进的方向。第一个理由是什么？



# 5 磁性体




## 虽然都带有磁性但也有不同的性质

可把铁等变成磁铁，也就是说，使物体带上磁性称为**磁化**。

如图 1 所示，若把铁片接近磁铁，铁片就被磁化，其两端呈现 N 和 S 极。这种现象称为**磁感应**。

这时，铁片所呈现的磁极，接近磁铁的磁极(N)端产生不同极性的磁极(S)，另一端感应出同极性磁极(N)。磁铁吸引铁钉，铁钉就被磁化，这是由于与磁铁间的吸引力作用的缘故。

关于磁铁等对物质的影响，有强磁化的物质和弱磁化的物质(实际上大部分都是不能磁化的物质)，前者称为**强磁性体**，后者称为**顺磁性体**。由于顺磁性体几乎不能磁化，所以也称为非磁性体。

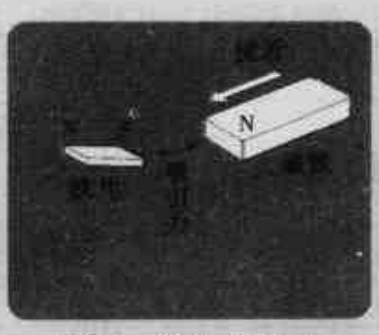



图 1　磁铁的吸力

强磁体:
铁、钴、镍
顺磁体:
铜、银、锌、铅、碳
永久磁铁材料实例:
淬火钢 . . . 钨钢
弯曲钢 . . . MK 钢
烧结磁铁 . . . OP 磁铁

One point　磁铁使用与存放时一定要注意，也就是说，磁铁中分子按一定方向整齐排列，显示出磁性，若磁铁跌落地上，或者用力敲打，使排列变成无序状态，就会失去磁性。

## 重新研究磁铁的用途

永久磁铁由于各自的特殊用途，制成具有不同形状和大小等的各种样



式。下面试举几例。

❶ 吸附用　小块磁铁的用处很多，如用于公告牌上文字或绘画的吸附用的钮扣状磁片，另外，还有在板后面粘有磁铁的公告牌。在家庭、办公室、工厂、学校，这些小磁铁都有各种各样的用途。图2是安装在平台上的划线盘的底座部分的磁铁的实例。

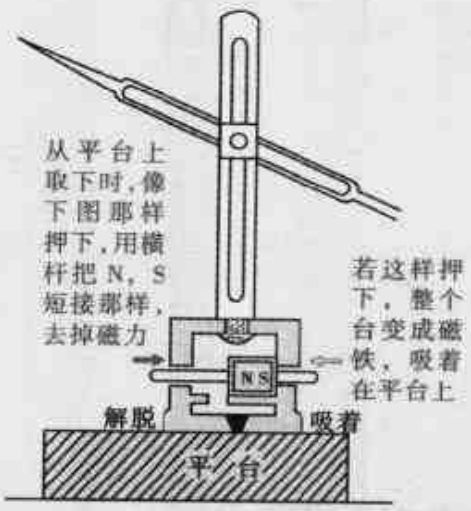


图2　磁铁的利用

❷ 磁场用　用矫顽力大的磁铁产生磁场，利用其磁通可制作动圈式测量仪表。另外，还可作为永磁发电机的转子，交流用测量仪表的制动磁铁，扬声器的磁场用磁铁等。

❸ 存储用　利用按照磁化的方向和强度来保持磁化状态的性质，可用来作为磁带录音机与录像机的磁带，计算机的软磁盘等存储媒体。

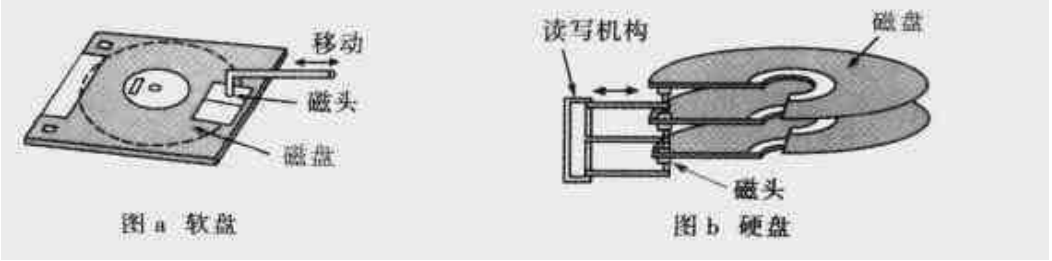
One point　热是损伤磁铁的原因之一，若对磁铁加热，则磁铁的分子运动活跃，这是由于从整齐排列的位置又恢复到无磁性的杂乱的位置。



Let's try

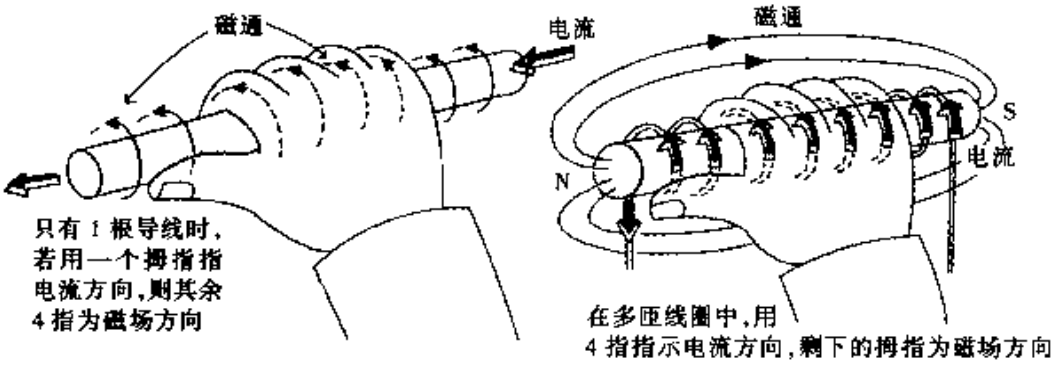
## 磁盘存储装置

计算机的软件与数据使用何种媒体存储呢？最近，有多种媒体，但这里所提及的是磁性存储媒体。如图a所示的那样，在塑料圆盘上涂有磁粉的软磁盘可以存储上百万的文字，但读写需要时间。图b是在铝圆盘上涂有磁粉的媒体，称为硬磁盘。其特点是，因是多个圆盘高速旋转，所以读写时间短，存储容量大。



图a　软盘　　图b　硬盘

# 6 电流与磁




## 电流产生磁场

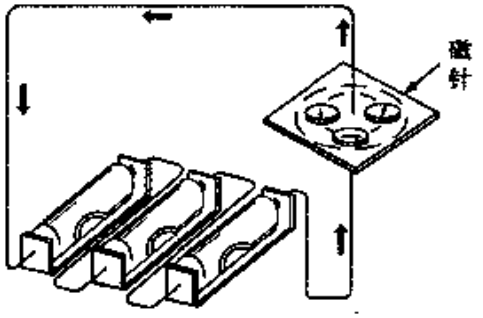


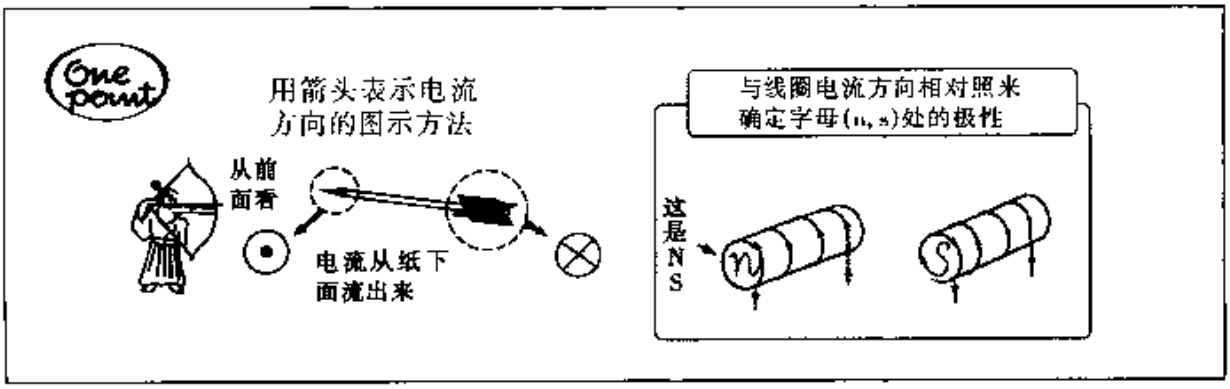

图1 电流与磁场的关系

约在18、19世纪，很多科学家研究了电流与磁之间的关系。其中，丹麦物理学家奥斯特发现了有电流流过的导体的周围空间存在着磁场。

图1证明了这种发现。导体穿过厚纸板的中心，若有电流从导体中流过，则厚纸板上的小磁针指示着磁通的方向。若电流反向，则磁针旋转180°，与原来方向相反。

这表示磁通与流过的电流方向有关。判断磁通方向的简便方法有“右手定则”。如本节开头题图的左图，用右手握住导体，若大拇指指向电流方向时，其余四指所指的方向就表示磁通的方向。

法国物理学家安培发现了电流与磁通方向之间的关系。如图2所示，若电流方向为右螺旋的前进方向，则拧动右螺旋，螺钉前进的方向就是产






生的磁场方向。这称为**安培右螺旋法则**。

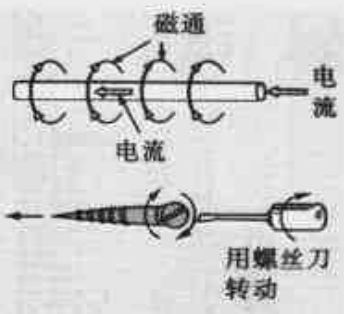


图 2　右螺旋法则

**增强磁场的方法**

如图 3 所示，导体卷绕成螺旋线圈时，导体的每一圈产生的磁场相加就是总磁场，螺旋线圈（用导体均匀而密集卷绕的）的一端表现为 N 极，另一端表现为 S 极。这时，判断哪一端是 N 极的方法如本节开头题图的右图所示，这也是用右手定则来确定。若用四指握住线圈，四指指向电流的方向，则大拇指指向的是 N 极。

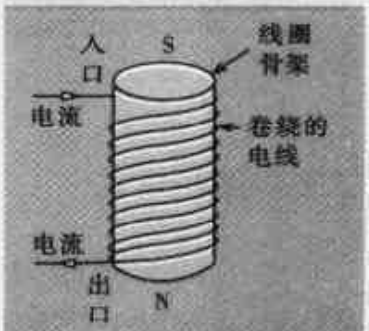


图 3　增强磁场

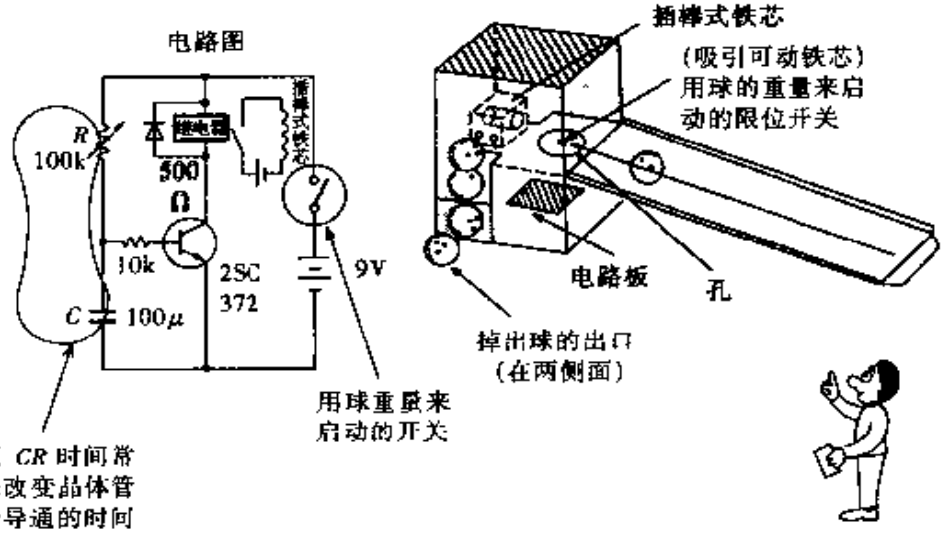
用螺旋线圈增强磁场强度，为了增大磁通，重要的是增大“安·匝”数（匝数乘以电流）。

单位限于[A]。因此，若说 500[A]的磁动势，则可以有各种组合，如 50[匝]×10[A]=500[A]，100[匝]×5[A]=500[A]，500[匝]×1[A]=500[A]，任何组合均可。

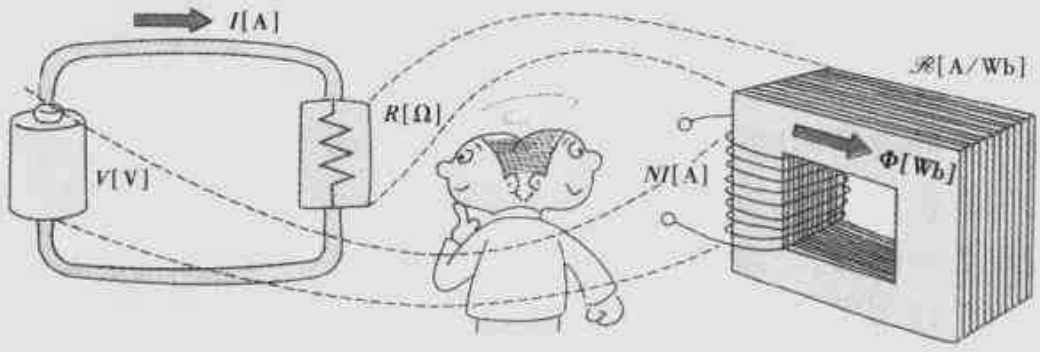
## 制作高尔夫球练习机

制作高尔夫球自动练习机。

若球进入洞中，少许时间球就飞出。



# 7 磁学中的欧姆定律




**磁路中所用术语**

电流的通路作为电路来处理，而磁通的通路就是磁路。描述磁路性质与参量的术语与描述电路时非常类似。将下表左右两栏进行比较，这样对比便于记忆。

| 磁 | | | 电 | |
|---|---|---|---|---|
| 磁通数目 | $\Phi$ [Wb] | ⇔ | 电流 | $I$ [A] |
| 磁动势 | $NI$ [A] | ⇔ | 电动势 | $V$ [V] |
| 磁阻 | $\mathscr{R}$ [A/Wb] | ⇔ | 电阻 | $R$ [Ω] |

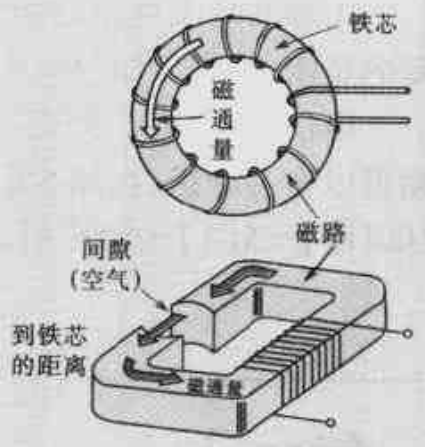



图 1　磁路实例

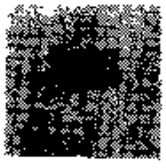
这里磁动势 $NI$[A] 在磁路中是产生磁通的原动力，但有时也用符号 $\mathscr{F}$ 表示。而且，上述各参量之间的关系与电学中的欧姆定律相同，作为**磁学的欧姆定律**，下述公式成立：

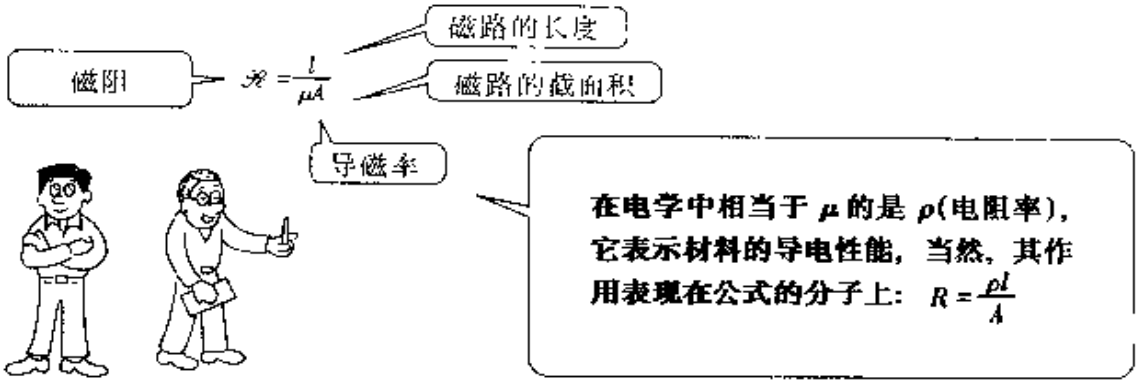


$$\Phi = \frac{\mathscr{F}}{\mathscr{R}} \quad \text{即} \quad \text{磁通} = \frac{\text{磁动势}}{\text{磁阻}}$$

式中，称为磁阻的是表示在磁通路中阻碍磁通通过的性质。与电学中的情形相同，磁阻的大小与磁路长度 $l$[m] 成正比，与磁路的截面积 $A$[m²] 成反比。而且，磁路使用材料不同也有影响。

因此，表示磁路材料导磁能力的值是**导磁率**，在3的“let's try”中已经给出，用 $\mu$ 表示，单位为[H/m](亨[利]/米)。若用公式表示，则有





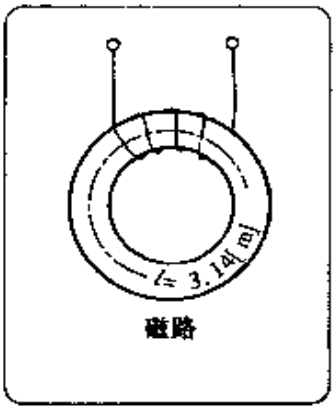

One point

电路中有电阻 $R$，若电阻中流过的电流为 $I$[A]，就会产生 $I^2R$[W]的焦耳热，变成消耗功率，但在磁路中，$\Phi$ 不变期间是不消耗能量的。

电路中，导体的导电率同周围的绝缘体的导电率相比约为 $10^{20}$ 倍，而磁路中，磁性体的导磁率是其周围的非磁性体的导磁率的 $10^4$ 倍左右，从磁性体的表面也泄漏出很多磁通，称为漏磁通。在磁路中必须考虑漏磁通的问题。

Let's try

## 试进行磁路计算



磁路

在磁路中，用产生磁通的磁动势 $NI$[A]除以磁路长度 $l$[m]，就得到对应于每 1[m]长磁路的磁动势，即 $NI/l$，但与线圈中产生的磁场强度相同。

【问】 右图所示铁环材料的导磁率为 $4\pi\times10^{-5}$[H/m]，长度为 3.14[m]，截面积为 25[$cm^2$]，试计算其磁阻。铁环上卷绕着 150 匝的线圈，流过的电流为 2A，试求其产生的磁通。

【解】 由 $\mu=4\pi\times10^{-5}$ [H/m]，$l=3.14$ [m]，$A=25\times10^{-4}$ [$m^2$]，求出磁阻 $\mathscr{R}$ 为

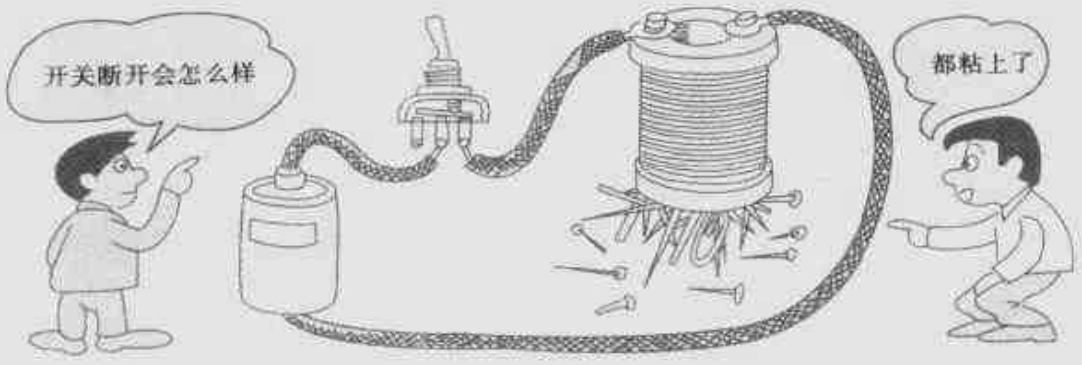
$$\mathscr{R}=\frac{l}{\mu A}=\frac{3.14}{4\pi\times10^{-5}\times25\times10^{-4}}=\frac{3.14}{\pi\times10^{-7}}=10^7\ [\mathrm{A/Wb}]$$

又因为，$N=150$，$I=2$，由此得

$$\Phi=\frac{NI}{\mathscr{R}}=\frac{150\times2}{10^7}=3\times10^{-5}\ [\mathrm{Wb}]$$



# 8 电磁铁




## 电与磁铁融为一体

电与磁铁融为一体，从字面上解释就是电磁铁. 实际也是这样。对于磁路来说，把锻铁等作为芯子插入螺旋线圈时，就会产生剩余磁通，作为芯子插入的锻铁就变成磁铁。本节开头的插图就表示这种状态，电路图如图 1 所示。

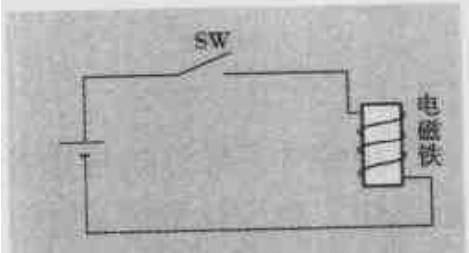



图 1　电磁铁回路

若断开开关，铁钉就掉落下来，然而，开关照样是断开的，若在电磁铁附近有铁屑，当然会吸附一些铁屑。这就表示剩有少许磁性，称为**剩磁**。

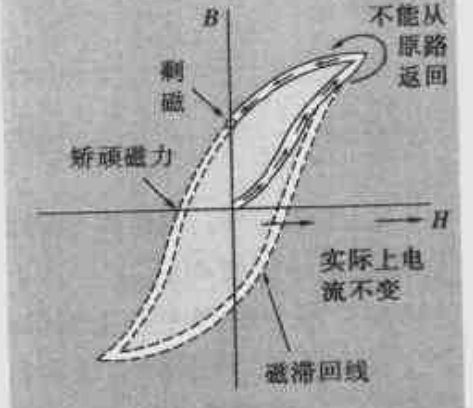
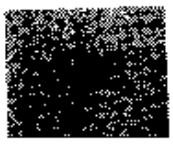



图 2　磁滞回线

这种现象有助于了解铁被磁化时，随着磁化力减弱，逐渐减小到零，铁芯中产生的磁通以及磁通密度是如何变化的。这种变化绘成曲线就如图 2 所示。若同时绘出电流反向时的曲线，就称为磁滞回线，这是表示磁的重要性质的曲线。铁芯若采用中碳钢，剩磁较多，这中碳钢就变成了永久磁铁。

对于图 2 所示曲线，有起初从零开始逐渐向右上增大的曲线，它是求出磁化力 $H$[A/m] 从零开始增大时的磁感应强度 $B$[T] 的变化的曲线，开始的这部分称为**磁化曲线**或 $B$ - $H$ **曲线**。

$B$ - $H$ 曲线的形状因铁的种类而有所不同，但其变化趋势都相同。



### 插入铁芯有力吗?

图 3 中，先对线圈进行励磁，再把铁芯插入线圈的一端时，磁通集中通过铁芯，结果，由于磁力线收缩形成的力，要把铁芯拉入线圈内，一松手，铁芯就被拉进线圈的中心。这是磁力变换为机械运动，是能量形式变换的一种表示。

与吸入铁芯的动作类似的有**继电器**。图 4 示出了继电器的结构，它是在电磁铁的外面放置可动铁片，铁片被吸引或被释放时，就使电路接通或断开。也可以认为这是一种磁开关。

继电器应用范围非常广，用于很多地方。

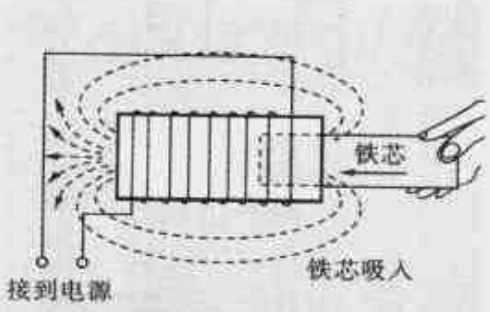
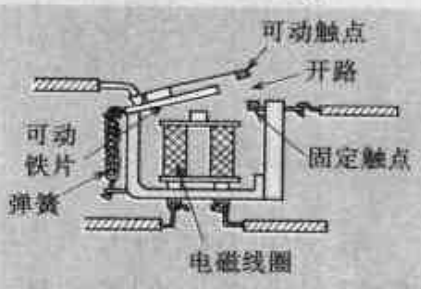



图 3　铁芯吸引



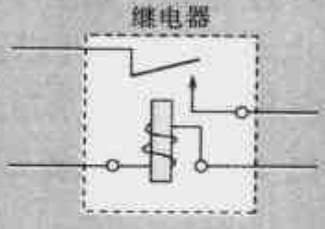




图 4　继电器

Let's try

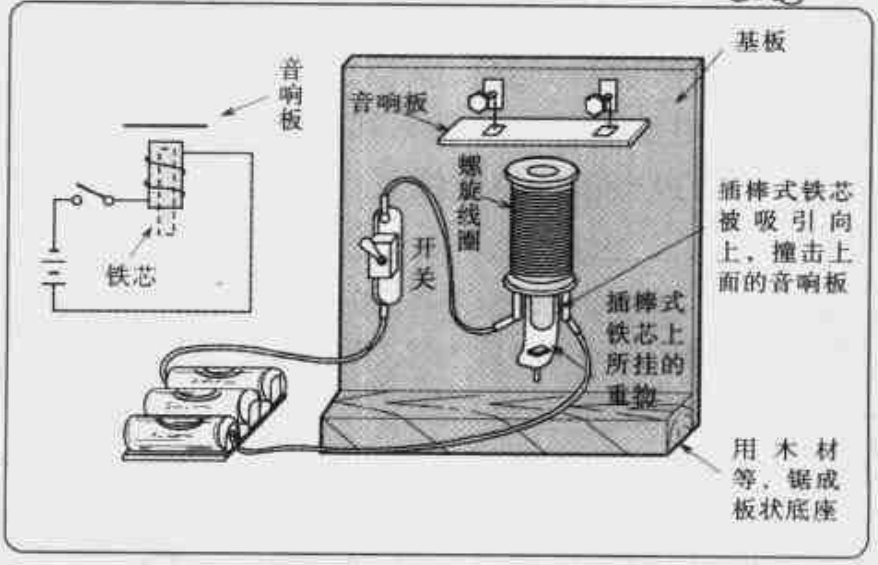
### 制作钟琴

试考虑利用螺旋线圈吸入铁芯的现象来做工作。

右边实例表示制作钟琴的情况。

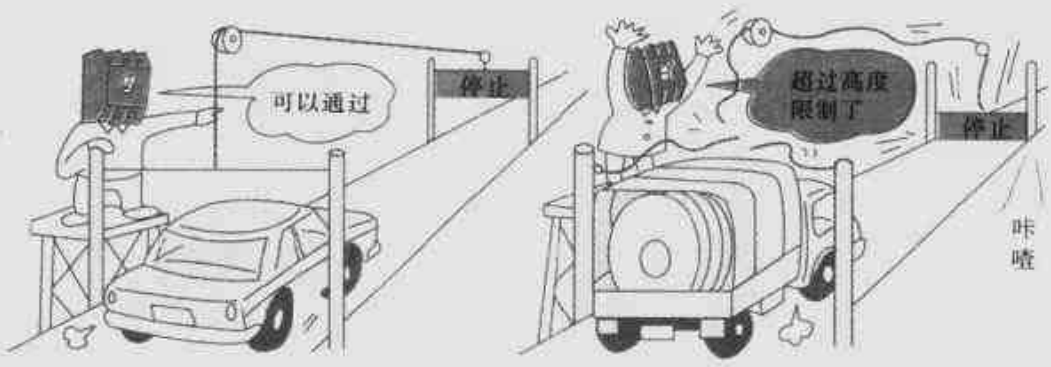
自己试做做就行了。








# 9 电磁铁的应用




## 安匝数的意思

对于电与磁的关系，电流产生的磁场强度如在6中所介绍的那样，它与**安匝数**有关。如果线圈的匝数固定不变，按照电流的大小可以产生强弱不同的磁场。应用此原理的是过电流断路器。

图 1 是说明电流断路器动作的实验组装图。

该电路的特点是，可动铁片的触点跟线圈串联连接（这与前面介绍的继电器不同）。因此，若流过与负载相连的这根导线中的电流超过规定值，则磁场的力超过止住铁片的弹簧的拉力，铁片被线圈吸过去，触点断开，使电路被切断。这样，就担当起作为看守者监视过电流的任务。如果接入控制杆，安上保险丝，过电流后也能恢复正常。

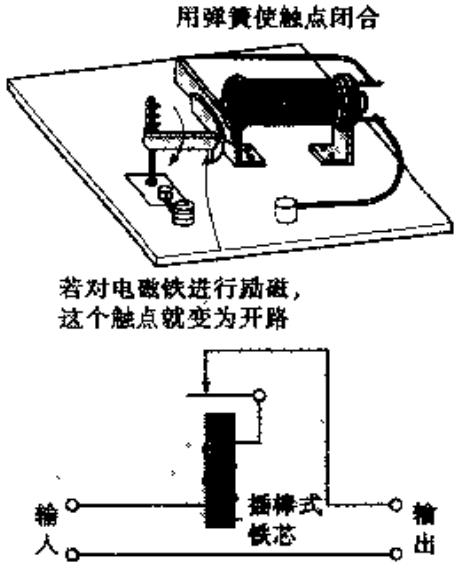
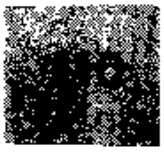



**图 1　过电流断路器的原理**

> One point　过电流断路器是保护电路的装置。在家庭里若过电流断路器动作，重新接通电路后立刻又动作时，要查找原因，进行修理。

## 继电器的用途

继电器是用低电压小电流的电路控制大电流电路的装置，应用范围非



常广。其工作原理已在8中进行了介绍，这里试举出继电器的几个应用实例。

❶ 从安全方面考虑，因用低压电路进行操作，所以，操作者比较安全。

❷ 大电流设备也可以位于远处，而且，可以把低电压线接到此处。

❶ 继电器的开关动作非常快。

这样，在家庭也好，工厂也好，用汽车的布线使喇叭发声，点亮床头灯，控制起动电动机，电压及电流的控制器等，到处都使用继电器。

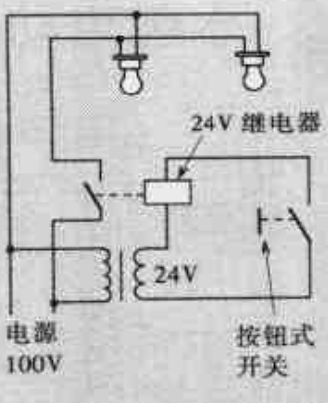



图 2 家庭用继电器控制电灯亮暗的电路




继电器从用于电力控制的大型继电器到所谓的小型继电器，各种形式的都有。若列举供选择的参数，则有

❶ **线圈的额定值** 用于直流，还是交流，几伏，几安。

❷ **触点容量** 交、直流分别能切断几伏，几安。

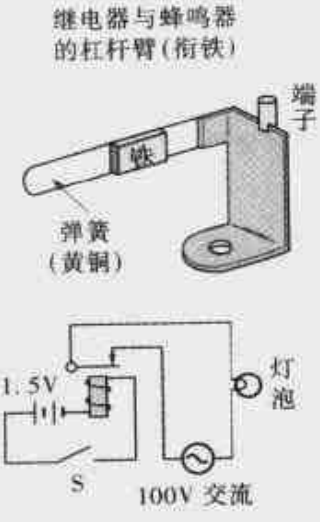
❷ **触点对的数目** 能同时动作的触点有几对。

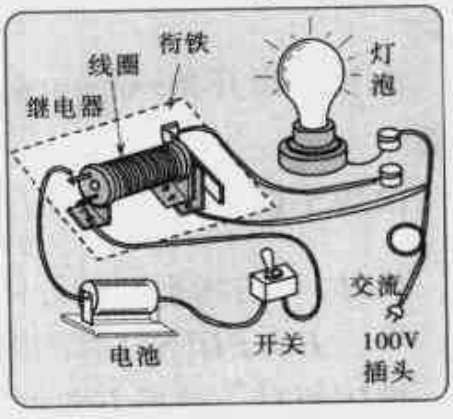



## 继电器的原理

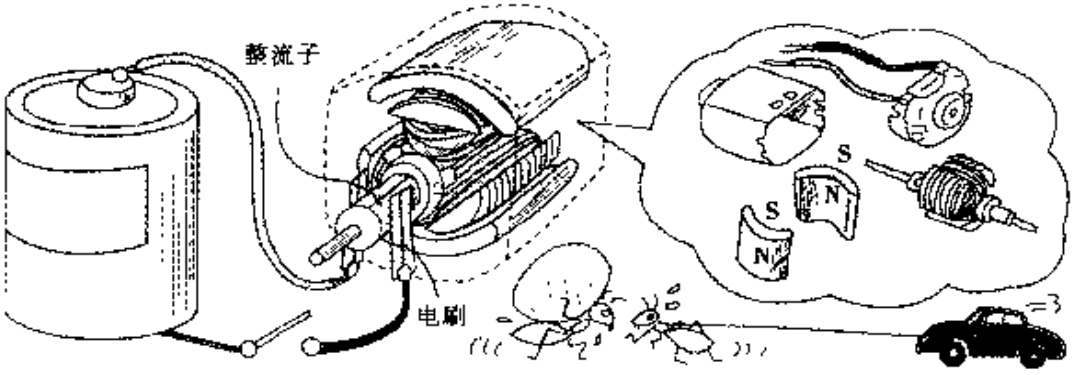
用在各种实验中使用的螺旋线圈内插入铁芯的电磁铁，试制作如右图那样的杠杆臂（称为衔铁），作为继电器使用。





# 10 永磁电动机




## 电磁力是怎样产生的

如图 1 所示，两磁极 NS 之间放置 1 根导线，考虑其中流过如箭头所示方向的电流 $I$[A]的情况。

图 2 是没有电流流通时的磁力线分布情况，以及只有导线产生的同心圆状的磁场重叠而画出的情况。

图 3 示出图 2 的合成情况，图中，导线的上部示出图 2 中的两种磁力线之差，下部示出磁力线之和。

由于磁力线是像橡皮筋那样的东西，所以当它收缩时导线就被向上提，受到箭头方向的力 $F$。这就是电磁力的方向。判断 $F$ 方向的简便方法称为**弗莱明左手定则**，确定方法如图 4 所示。即，力为 $F$，磁力线的方向为 $H$，电流为 $I$，左手的三个手指（拇指，食指，中指）互相垂直地伸开，如下述那样，就可明确相互关系。

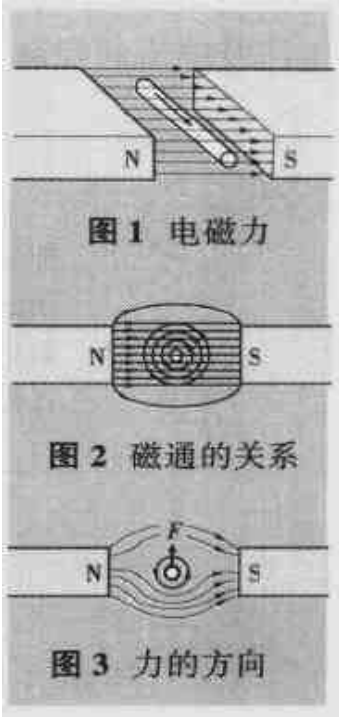


图 1 电磁力



图 2 磁通的关系



图 3 力的方向

由长手指开始→(电)(中指)(磁)(食指)(力)(拇指)

或者

由短手指开始→(F)力)(H)(磁力线)(I)(电流)

(按罗马字母顺序)

另外，与磁场垂直的导体的作用力为

$F = BIl$[N]（参照图 4）。

导体相对于磁场方向的夹角为 $\theta$ 时，作用力为

$F = BIl\sin\theta$[N]。

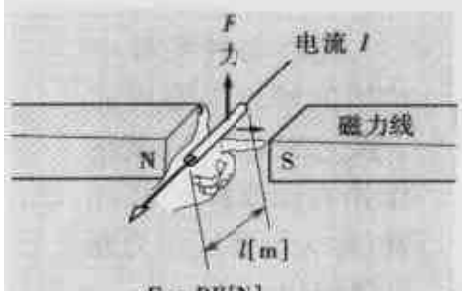


图 4 电动机的原理





## 电动机的应用

电磁力当然可以转换为机械能，这种现象的发现应当感谢中世纪的技术人员。电动机可用于家庭的电冰箱、洗衣机、吸尘器等，也可用于开动学校和工厂的机器，产业界也一样用它来开动机器，真正地节省了劳动力，做了有用的工作。图 5 是为了说明电动机转动状态的原理图，与本节开头的题图大致相同。线圈接到整流子 A，在这里接触电刷。

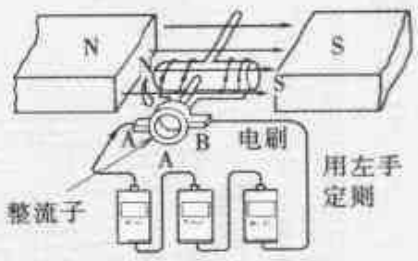


图 5　电动机原理

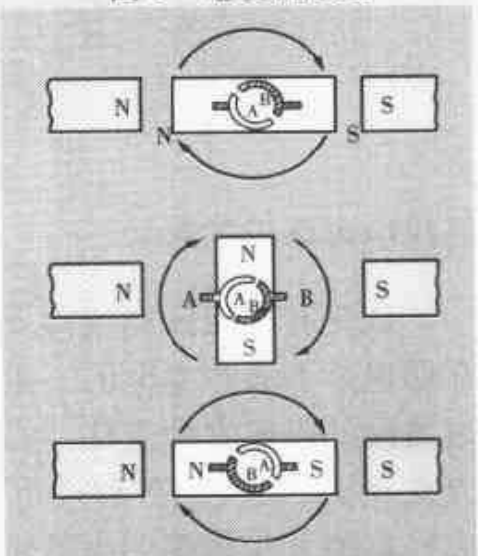


图 6　转动状态

电刷作为外部电流流入线圈的通道。图 6 是说明电动机转动的示意图，电动机转动时整流子的位置即使发生变化，通常也在同方向产生旋转力，使电动机转动。

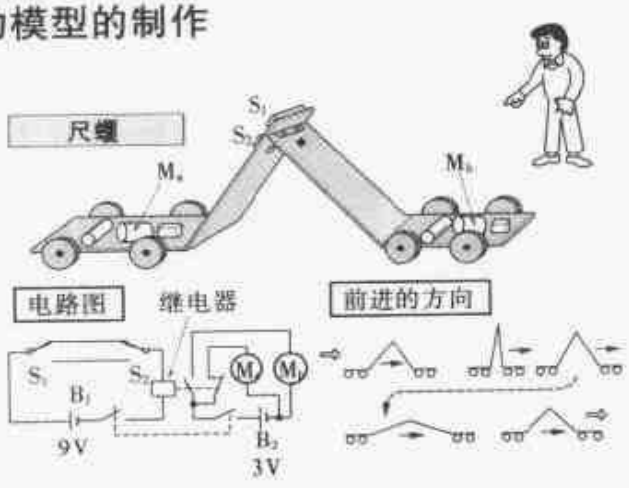
特别是在本节开头题图中，这是称为永磁电动机的小型电动机，它应用广泛，从用于活动模型到用于日用电器。

例如，电动玩具、防碰撞反光镜（fender mirror）、台式吸尘器、卷笔刀、电动剃刀、牙刷、警报灯、汽车保洁器、小型割草机等。

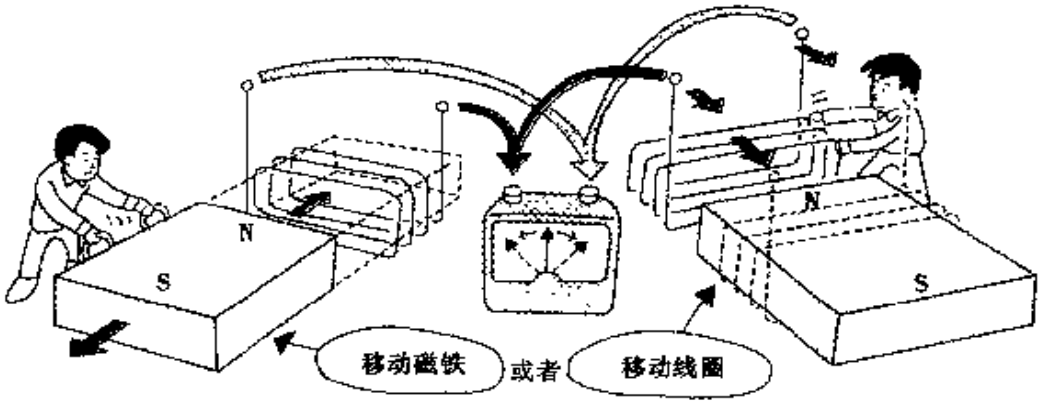
### Let's try　活动模型的制作

这里给出到目前为止所介绍的继电器、开关、永磁电动机来制作活动模型的实例。有机会请试做一下。

板之间的连接可使用绞链。



# 11 发电原理




**寻找电磁感应的起源**

认为有了磁铁和线圈就能产生电的人不是没有，但仅把磁铁和线圈放在那里是不会产生电的。重要的是，需要**让穿过线圈的磁通发生变化**。通过这种磁通变化的方式，可以转变为各种产生电的过程（**电磁感应**）。本节开头的题图画的是，移动磁铁引起磁通变化及移动线圈引起的与线圈交链的磁通的变化的示意图。这里，让我们研究一下，当线圈接近磁铁时，即磁场中的导体运动时会产生多大的电压。图 1 是考虑只有 1 匝线圈的情况，为了确定这时产生的**感应电压的方向**，使用图 1 所示的**弗莱明右手定则**，这就是："若运动方向（$F$）为拇指指向，磁场（$H$）方向为食指指向，则感应电压（电流 $I$）的方向就是中指方向。"

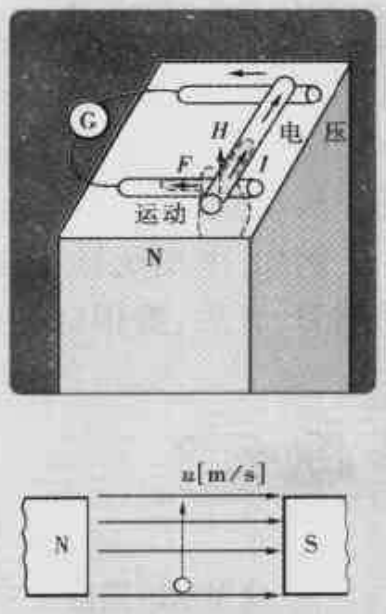



图 1　电压的产生



若设**磁感应强度**为 $B$[T]，导体长度为 $l$[m]，其运动速度为 $u$[m/s]，则**感应电压**的大小为

$$v = Blu \ [\mathrm{V}]$$

若导体倾斜角为 $\theta$，则 $v = Blu\sin\theta$[V]。



首先应用的是发电机

为了利用感应电压，可考虑用由多匝导体绕成的线圈来取代只有 1 匝导体的线圈，在磁极(这也是用电磁铁产生的)间转动这个线圈，于是，在图 2 中线圈通过接点 A(称为**整流子**)接到来自外部电路的接点 A(称为电刷)，流过的电流如箭头方向所示。若线圈转过半圈(180°)时(图 3)，线圈内产生与前面极性相反的电压（B 线圈位于图 3 中 A 的位置)。然而，这也是由于整流子与电刷的作用，外部电路中流过的电流与前面方向相同。这时产生的电压(电流)如图 4 所示，是一种脉动直流。这样，将感应电压原理应用于发电机，就产生了电。这里说明的是直流发电机的原理。有关交流的问题将在后面介绍。

这里使用脉动的术语，已在本书第 1 章 12 中作了说明，请参阅该节。

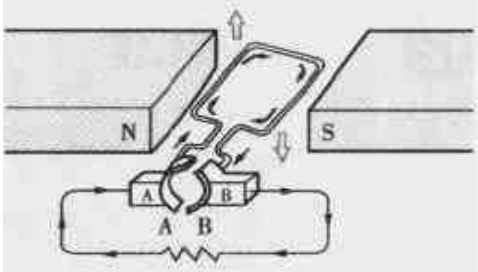


图 2　电压的产生(1)

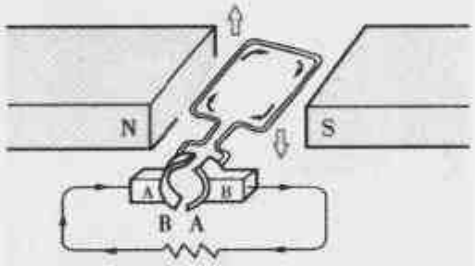


图 3　电压的产生(2)

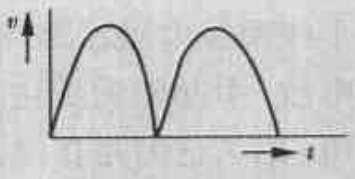


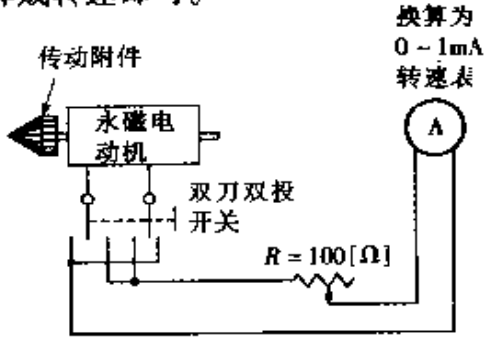
图 4　脉动电压的产生

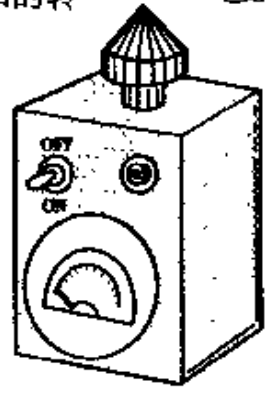
## Let's try　制作转速表



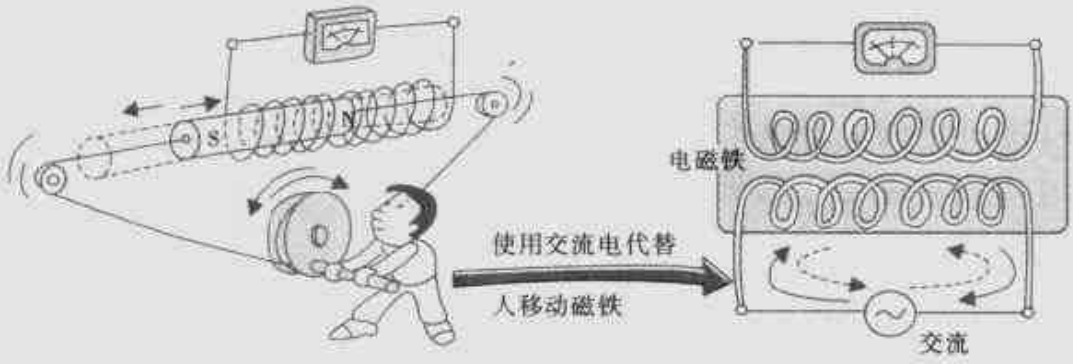
在 10 中介绍的电磁发电机本来是直流发电机。试用它来制作转速表。

电路如右图所示，100Ω 电阻用于校正刻度，测量已知的转速，根据其电流值换算成转速即可。



# 12 变电原理




## 又一个定律

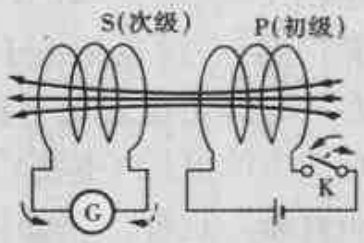


图 1　电压感应

本节开头的左边题图是把棒形磁铁从线圈中拉出，或插入线圈中。由此产生电压，这在11中已进行了研究。如图 1 所示，设置两个线圈，一个线圈像电磁铁那样，时而流过电流，时而切断电流，引起磁通变化，另一个线圈就产生感应电压。因为这时是直流，为使电流发生变化(即磁通变化)，需要使用开关来“接通”和“切断”电流。所以，若电源使用本节开头的右边题图那样的交流(大小和方向都变化)，另一个线圈就产生同样的交流，这时，为了**确定感应电压的方向**使用下述的**楞次定律**。

“感应电压的方向是使得由该电压产生的电流阻止线圈内磁通变化的方向”，而大小”与磁通变化率和线圈匝数之积成正比”。

$$v = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [\mathrm{V}]$$

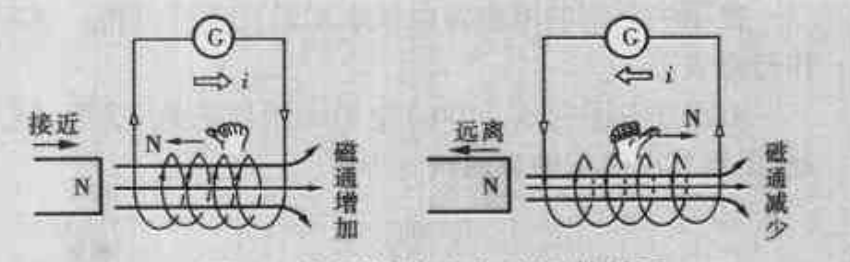
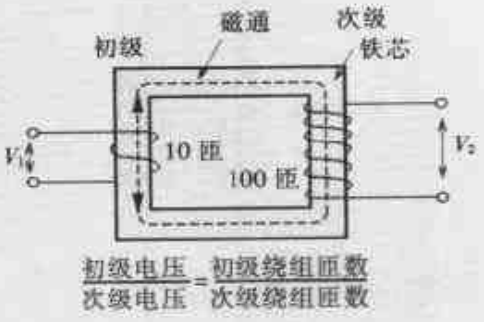


图 2　电压的产生与磁通的关系

楞次定律说的是完全跟人“作对”的事情。对于图 2 的左图，若 N 极接近线圈，磁通就增加，但为了**阻止其增加**，要在线圈内跟自己靠近的这一侧导线中由下向上流过电流，由此产生向左的磁通，抵消当前增加的磁通。就产生这样方向的电压。

## 变多少，怎样变

在本节开头右边的题图中，有两个线圈，当一个线圈的电压（电流）发生变化时，就引起另一个线圈的电压（电流）发生变化，利用这种现象的是**变压器**。变压器的绕组分别称为初级绕组和次级绕组，根据二者之间的匝数关系可以升压，或者降压。由于具有这种能力，所以，变压器的应用非常广泛。另外，如图 3 所示，初级电压与次级电压之比等于初级绕组匝数与次级绕组匝数之比。




$$\frac{\text{初级电压}}{\text{次级电压}}=\frac{\text{初级绕组匝数}}{\text{次级绕组匝数}}$$

图 3　电压的关系

由此现象发现，一次回路与二次回路不必直接连接，也能传送电能。能量变成磁通进行传送。变压器是电力配电中不可缺少的装置。

变压器可以改变电压，也可以改变电流，但也要注意作为电功率是不变的。图 4 是收音机中使用的输出变压器。

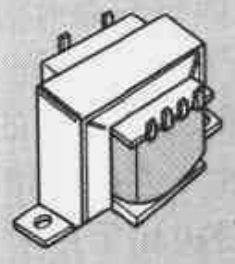


图 4　输出变压器

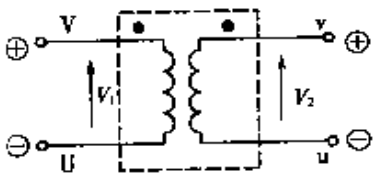




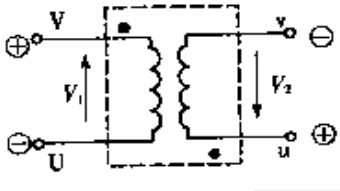

### 变压器的极性

变压器是用于交流场合的装置，若说起端子有极性，也许会使人产生诧异的感觉，但若从变化过程中取出一瞬间进行观察，也可以说有极性。右图所示的就是考虑这种情况的极性。

初级与次级间，相互相同的同名端子为同极性（称为加极性）

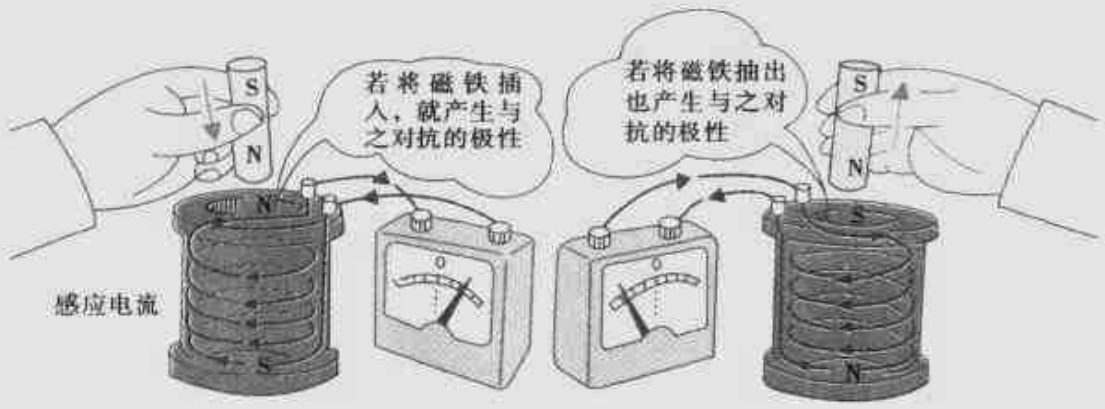



同名端子位于对角线上为反极性（称为减极性）






# 13 电　　感




对线圈的性质给出定义

如11所介绍的那样，若从线圈中取出或插入永久磁铁，就会产生感应电压，这时，因感应而流过的电流方向与磁铁运动有一定的关系。本节开头的题图示出了这种关系。这就是**楞次定律**的应用，感应电流产生磁场的极性表现为对抗永久磁铁的极性的运动。在本节开头的**题图**中，若注意磁铁的 N 极，则由于左图是将磁铁的 N 极放进线圈，所以，就相斥. 线圈也形成 N 极（同性磁极相斥），右图是将磁铁的 N 极从线圈中取出，为了产生吸力以阻止磁铁的运动，线圈就形成 S 极。这样，线圈总是在“对抗”，就如同人一样，例如处于青春期的少男、少女就容易产生逆反情绪。

线圈直接连接直流电源，若有电流流通，由此电流产生磁场，恰与本节开头的题图中把磁铁放进线圈的情形相同，这时也感应出起反抗作用的电流。

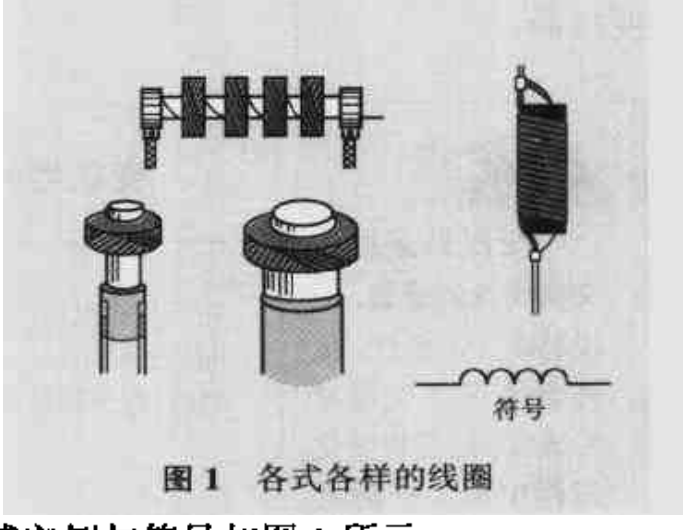


图 1　各式各样的线圈

这样，线圈中流过的电流也发生变化，决定起反抗作用的电流的性质及大小的物理量称为**电感**。电感实例与符号如图 1 所示。

电感线圈中有电流流过。当电流发生变化时，由于此变化引起线圈本身产生感应电动势。也就是说，电感是表示所产生的感应电动势大小的因素。这与线圈的匝数、形态及磁路的导磁率有关。



## 理解电感

$$V = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

电感的符号使用英文大写字母 $L$，用称为亨利 [H] 的单位进行测量。

当电路的电流变化率为**每秒 1[A] 时**，若在线圈中感应出 **1[V]** 的电压，就可以说这个线圈的电感是 **1 亨利** [H]。若用数学公式表示如右上角框中的公式所示。

式中，$\Delta I$ 是以安培为单位测得的电流变化量，$\Delta t$ 是以秒为单位测得的时间变化量。符号 $\Delta$ 就是**变化**的意思。根据此式，则有

$$L = \frac{\text{线圈的感应电压[V]}}{\text{线圈的电流变化率[A/s]}}\ [\text{H}]$$

为了增大电感量，可在线圈中插入铁芯。另外，数值小的电感（高频交流电路中使用）可取 [mH]（1mH = (1/1000) H）和 [μH]（1μH = (1/1000000)H）为单位。

【例】 0.5[H]电感线圈中流过电流，每 0.01 秒时间内电流变化 1[A]，问感应的电动势是几伏？

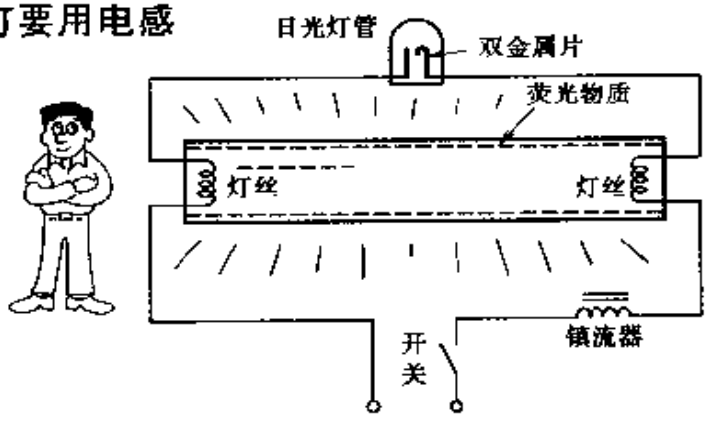


【解】 由上式，得

$$V = L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.5 \times \frac{1}{0.01} = 0.5 \times 100 = 50\ [\text{V}]$$

### 点亮日光灯要用电感

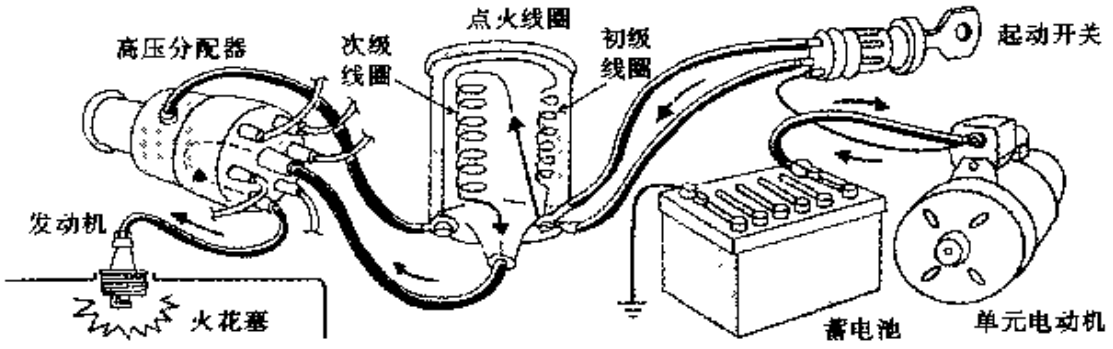
日光灯中有称为镇流器的电感，电流在其中流过，当电流在流动过程中被切断时，就产生很高的电压。利用此电压作为日光灯的启动电压，这就是电感的应用。




● 接通开关，日光灯管放电，内部发热，使电极闭合。

● 放电而冷却时，双金属片电极分开，分开时，在镇流器中产生电压。

# 14 感应线圈




**直流能使用变压器吗?**

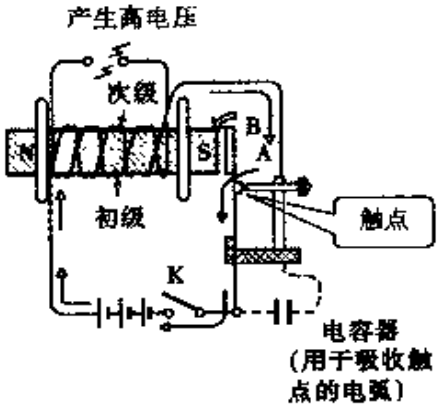



**图 1　感应线圈**

如在学习交流中所介绍的那样，变压器中必须流过交流，或脉动电流。直流相对于时间来说是不变的，因此，不能使用变压器。这时，要从直流得到非常高的电压可用**感应线圈**。这是利用了感应电压与磁通（电流）对时间的变化率成正比，与线圈的电感也成正比这一性质。如图 1 所示，在图中 A 点处，当触点交替地接通或断开时，使流过初级绕组中的电流发生变化，在次级就产生很高的电压。

这时，若接入开关 K，就成为这样的机构. 即初级绕组中流过电流，铁片 B 被吸引，使触点 A 断开。若触点 A 断开，则铁片 B 复位，触点 A 再次接通，开始重复动作。由图可知，初级绕组的匝数比较少，次级绕组的匝数非常多，因此，互感数值很大，就能感应出非常高的电压。

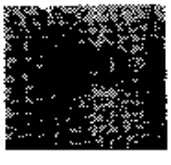



点火线圈的感应电压为 $e_2 = N_2\frac{d\Phi}{dt} = M\frac{di}{dt}$

感应线圈的电压与匝数的关系为

初级绕组 $e_1 = 12$ [V]　$N_1 = 20$ [匝]

次级绕组 $e_2 = 10\,000$ [V]　$N_2 = 20\,000$ [匝]



## 汽车的点火机构

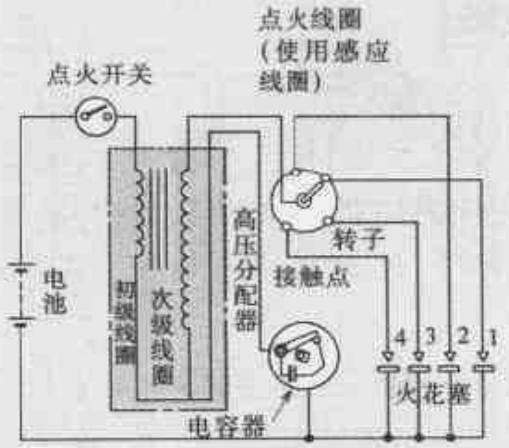


图 2 点火线圈

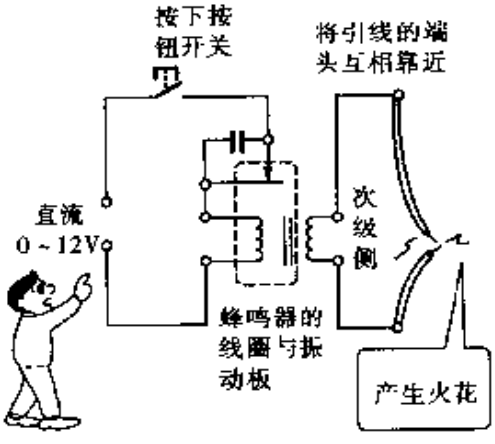
关于感应线圈的实际应用，观察汽车的点火机构就可知晓。示意图如本节开头的题图所示，实际的接线图示于图 2。

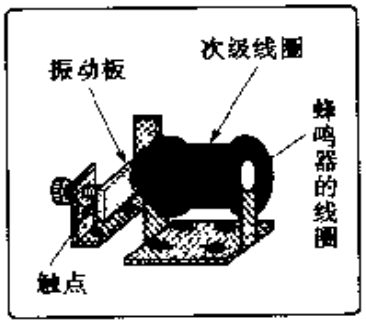
高压分配器的接触点是由凸轮轴进行操作的机械开关。它进行初级线圈的“断开”和“接通”。于是，次级线圈中产生 15000V 以上的电压，由次级导线把它接到高压分配器的中间部位。安装在高压分配器内的凸轮轴上的转子与凸轮轴同时转动，顺次接到连接火花塞的末端。这样做，次级电压就送到火花塞。即使是用电池那样的直流电源产生的电流，经过变压也可以变成很高的电压。就是说这是利用了用开关“接通”和“断开”初级侧的电流，在感应线圈中就产生次级电压的机理。

在“one point”中给出的 $M$ 值称为**互感**，为了与之相区别，现在所说的 $L$ 称为**自感**。$M$ 表示有两个线圈，当一个线圈中流过的电流发生变化时，另一个线圈中产生多大的感应电动势，单位为亨利[H]，与 $L$ 的单位相同。

### 做个简单的实验！

在蜂鸣器的线圈上缠绕匝数较多的次级线圈，若用按钮开关使蜂鸣器发声，这就使初级线圈的电流时通时断，从而在次级线圈上产生很高的电压。





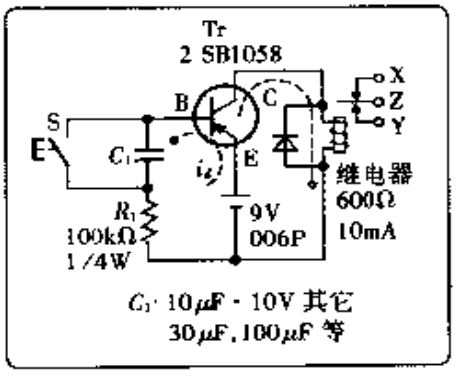



# 本章小结



**1.** 应用继电器的工作场合有很多。下面给出用继电器及下一章将要介绍的电容器、还有其它资料中介绍的用 1 个晶体管构成的简单电路的工作实例。

【工作】 ❶ 准备阶段 安装好电路，通过晶体管 E、B 极的电流 $i_d$ 对电容 $C_1$ 进行充电。



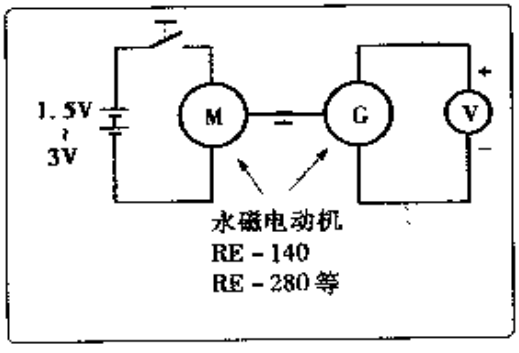

❷ 若按下开关 K，则 $C_1$ 的电荷瞬间放电，然后如①那样动作，这时继电器也动作，继电器的触点 Z－Y 闭合，受上述触点控制的电路中就有电流流通。

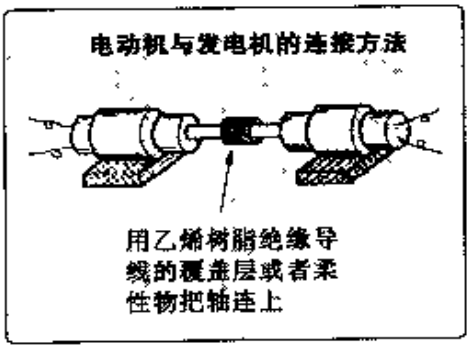
❸ 继电器动作的时间（Z－Y 之间），由第 4 章小结中的介绍可知，因表示 $C_1R_1$ 乘积的时间不同而异，改变 $C_1$ 就可改变时间。

【问题】 在上述电路中，若 $C_1 = 10[\mu F]$，以 [F] 为单位，$R_1 = 100[k\Omega]$，以 Ω 为单位，试计算 $C_1 \times R_1$ 是多少。答案中相应地以[秒]为单位。

**2.** 10中介绍的电磁电动机，在11中就原封不动地作为发电机进行介绍。为了弄清此问题，试用 2 台永磁电动机做一下实验。简单电路如下。

测试仪表用万用表，只测试电压即可。




[问题的答案] $C_1 \times R_1 = 10 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3 = 1000 \times 10^{-6} \times 10^3$

$= 10^6 \times 10^{-6} = 1$ [秒]

这表示只要 1[秒]时间继电器就动作。



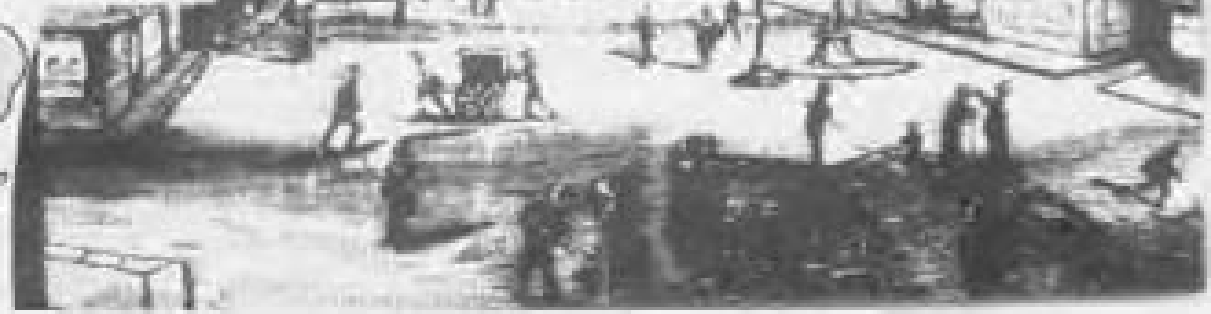
# 4 静电的作用















# 本章要点及学习方法

在电气技术的研究初期，人们对电荷如何存储进行了研究。

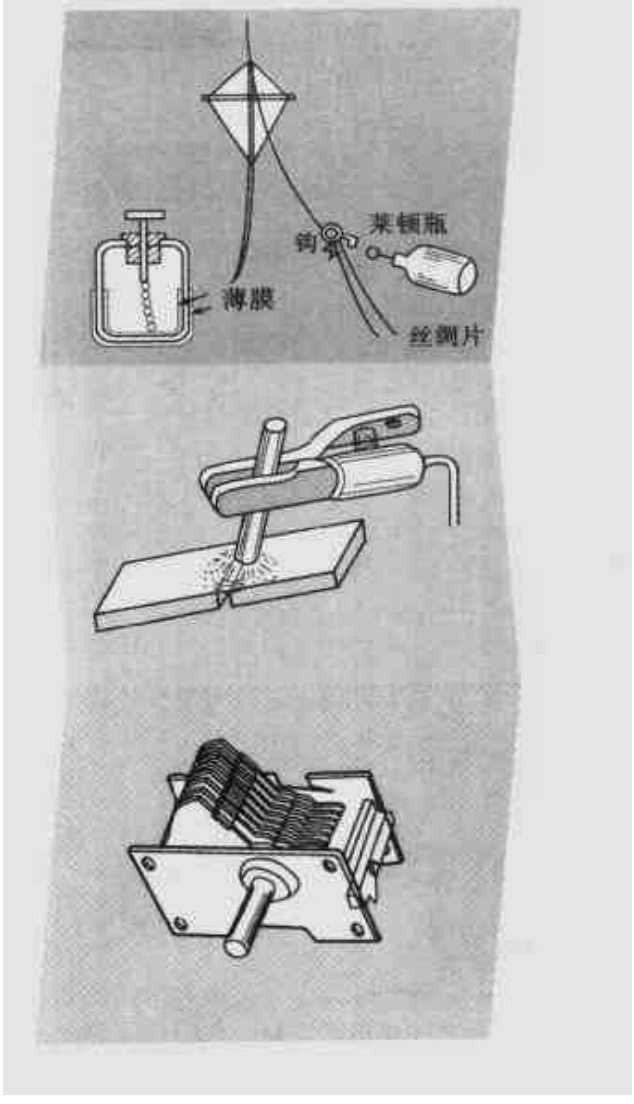
莱顿瓶是当时的研究成果之一，这是在一个玻璃瓶的内壁和外壁贴上锡箔而构成的容器。这种容器如何存储电呢？是用锁链和棒吗？

若电量不断地积累，就会对人产生电击，或者产生火花。这些在实际应用中如何处理，而且需要注意什么样的问题呢？

技术的不断发展，使人们的生活丰富多彩，但也带来了公害的烦恼。这种公害之一就是粉尘带来的空气污染。在减少发生粉尘时可使用静电的哪些性质以防止公害呢？

另外，存储静电的容器一般称为电容器，而电容量也是众所周知的一种电量。

电容具有的特征在电工学、电子学方面有很多应用实例。本章试回答下述一些问题：






(1) 静电是什么?

(2) 静电彼此之间有何种力的作用。

(3) 静电的利与弊。

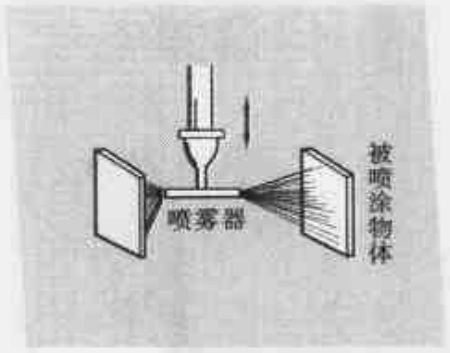
(4) 电场是什么样的?

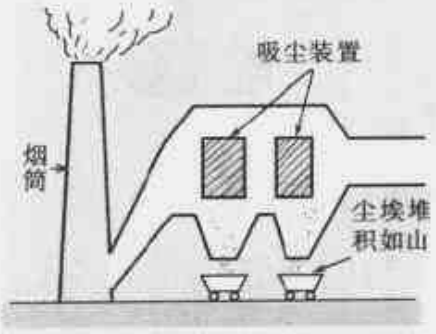
(5) 静电的存储和电压的关系,放电的机理。

(6) 电容器是什么?

(7) 电容器在电路中起什么作用?

通过对以上问题的阐述,可对静电有基本的了解。




## 本章要学习的内容

静电是怎样产生的?是如何起作用的呢?这里将介绍静电的基本知识。

若把几个电容器连接起来,这时电压是如何施加的?这里将介绍电容器及其应用。




蓄积电量的地方与没有电量的地方有什么不同。这一部分介绍这些内容。

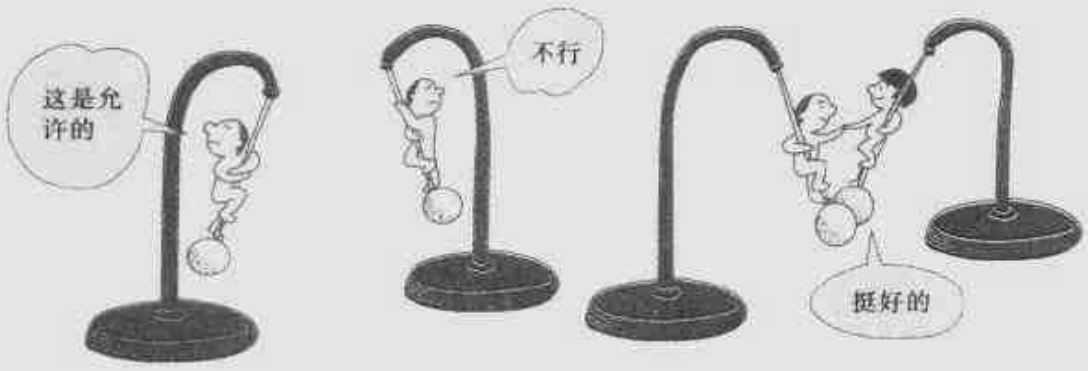
能存储作为静电之源的电荷,以及存储电荷的容器问题,深刻研究这些内容是非常重要的。



这里将介绍放电与电位的关系。



# 1 何谓静电




## 静电的种类与大小

所说的静字也是"休息中"的意思。电也有休息的时候。电流是流动的，若从解释各种现象的观点来看，静电与电流没有什么不同。然而，如第 1 章 1 所说的那样，静电可用摩擦等各种方法产生。人们在地毯上行走时，背靠椅子下滑时等情况下，有时人体中就会存储静电。这时，若触摸其他人，或碰及门把手时就体验到放电的闪光。本节开头的题图显示了静电基本定律中有关静电的下述一些性质。

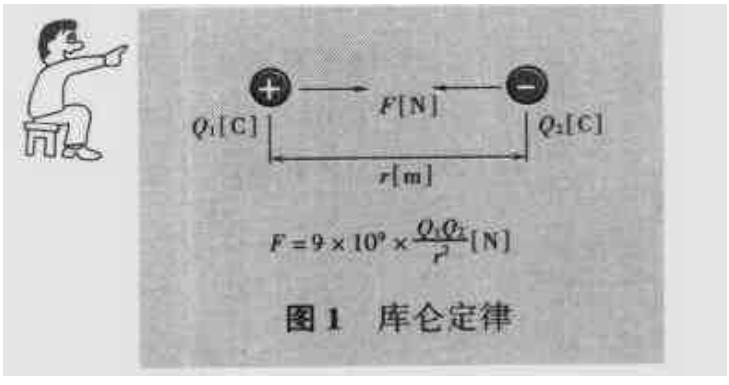


图 1 库仑定律

❶ 同种电荷相斥，

❶ 异种电荷相吸。

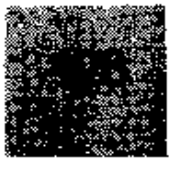
这种力称为**静电力**，关于静电力的大小可用公式表示，这就是法国科学家库仑发现的**库仑定律**给出的公式。即："两个点电荷之间的静电力（$F$）与两个点电荷（$Q_1$ 与 $Q_2$）的乘积成正比，与它们之间距离（$r$）的平方成反比"（图 1）。

One point

电量 1 库仑[C]的定义：根据图 1 给出的公式，若 $r=1$[m]，$F=9\times10^9$ [N]，则 $Q_1=Q_2=1$[C]。相等点电荷相隔 1[m]，作用力为 $9\times10^9$ [N]时电量就等于 1[C]。

（记住：库仑也认为这是古代人艰苦实践而获得的定律）





## 用实验进行验证

正如在第 1 章 1 的“let's try”中所提及的那样，玻璃棒与丝绸摩擦时，玻璃棒带正电。毛皮与橡胶棒摩擦时，橡胶棒带负电。试用下图所示的试验进行验证。

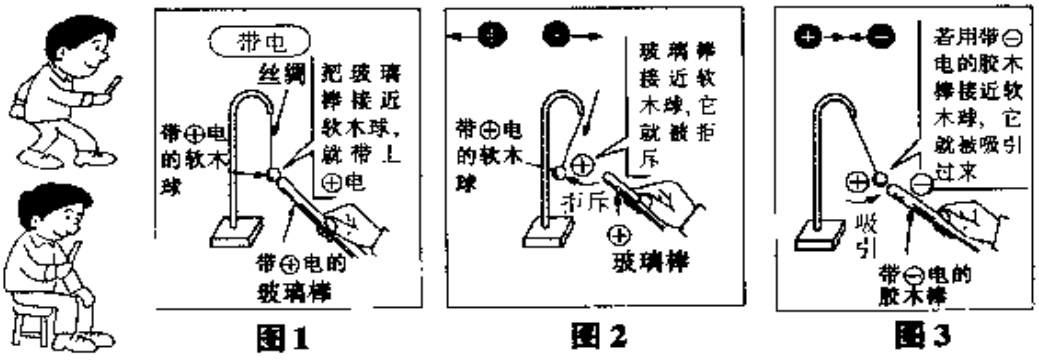



图 1　　图 2　　图 3

❶ 图 1 表明，带正电的玻璃棒碰及软木球时，电荷就转移到软木球上，使软木球带正电。

❷ 图 2 表明，玻璃棒与软木球相斥而推开软木球。即使用玻璃棒去碰软木球，也会相斥。

❸ 再拿带负电的橡胶棒靠近软木球，软木球则被橡胶棒所吸引（图 3）。

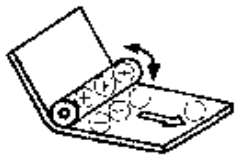
这样，通过实验就验证了静电的基本定律。



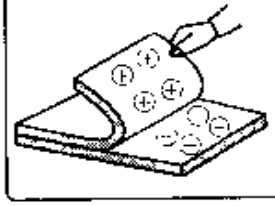
### 静电的产生

若在黑暗的房间里脱衣服，就看到蓝白色光，并听到噼啪的响声。这就是静电放电。下面试举出静电产生的一些实例。

① 物体摩擦时



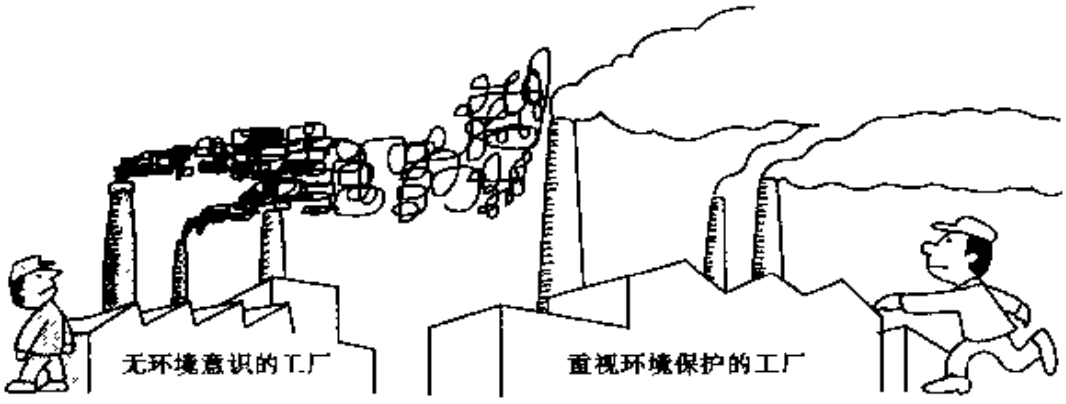
② 揭开接触在一起的物体时



③ 倒出液体时



# 2 静电的功与过




## 烦人的静电

关于静电，已在1中作了简单介绍，现对静电的带电现象进行归纳，而且还涉及到静电带来什么样的危害以及如何防止等问题。

❶ **固体表面带电** 用滚轮夹住塑料板进行传送时，滚轮与塑料板之间带电。另外，对于造纸业等，纸因产生静电而吸附在一起，往往造成损失。对此，人工增加作业场内湿度就可防止。

❷ **液体带电** 把油轮上的油卸到陆地上的油库时，或者在加油站给油罐汽车加油时，输油管要充分接地。这不是为了防止带静电，而是为了防止因带电而使输油管的电位升高(图 1)。

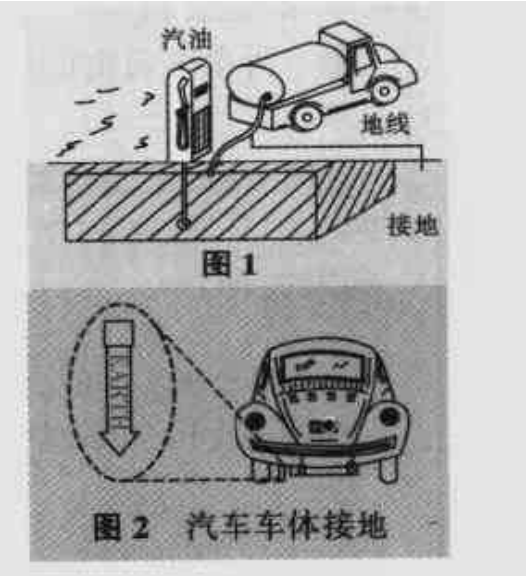


图 1


图 2 汽车车体接地

❸ **汽车行驶时带电** 新汽车在晴好的天气时行驶，或停靠开门时，有时会受到电击。这是由于轮胎与地面，以及整个车身与空气摩擦带电的缘故。为此，车下经常要挂上接地链条(图 2)。

带电现象有多种，例如①接触带电：物质接触摩擦时带电，②热电位差：不同温度的物质之间电子的移动，③压电现象：施加压力时带电，④表面吸附物质引起带电，⑤喷雾带电，⑥结冰带电等。



## 有用的静电

在工厂区树立着一排排的烟筒，不声不响地冒烟。其中，含有尘埃的烟散发到城市的空气中，变成对人有害的物质。静电的一项任务就是防止这种公害。

❶ **电吸尘装置** 把两块金属板面对面地放置，对它施加高电压，其间若有带电粒子就被吸引过来。此原理的应用如图 3 所示，如果收集电极为正，放电电极为负，发生电晕，烟中的粒子带上负电。它就被带正电的收集极所吸引，附在极板的表面上，经常清扫下来即可。用这种装置可以消除烟中 90% 的尘埃。

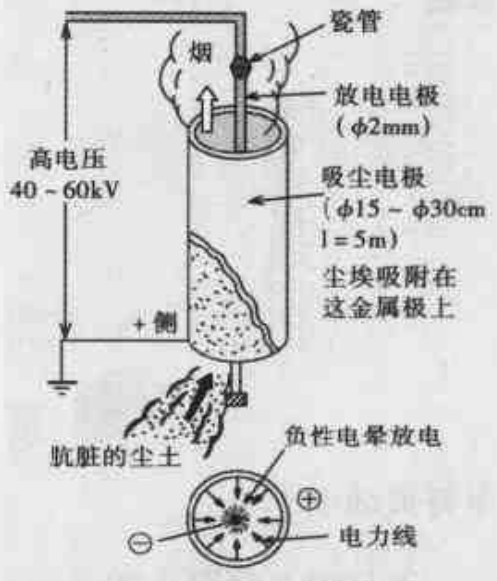
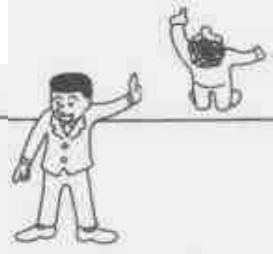


图 3 吸尘的原理

❷ **静电喷涂** 在喷嘴上施加负高压，若对被喷涂的物体施加正高压，雾状涂料就吸附在被喷涂的物体上，也可以在物体内进行喷涂，喷涂均匀性高。这就是静电喷涂。



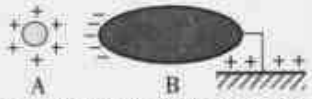
Let's try

### 电　盆

若有作为种子的电荷，就能多次取出电荷，这种装置（称为电盆）的原理说明如下。可与静电感应状态对照研究。



❶ 若 + 电荷 A 接近导体 B，就会感应出左 −、右 + 的电荷。



❷ 若导体的右端接地，+ 电荷就进入大地（实际上，+ 电荷与来自大地的 − 电荷中和了）。


❸ 若地线断路，电荷 A 就远离而去，导体 B 中就剩下负电荷。

# 3 电　场




电有灵魂吗?

正如第 1 章 1 中图 2 所示，带负电的橡胶棒接近验电器，为什么对验电器有影响呢？这用带电物质周围的空间存在着眼睛看不见的线来解释就清楚了。这种线称为**电力线**。在带电物体附近电力线最密，而且与离开带电物体的距离的平方成反比地逐渐变稀。

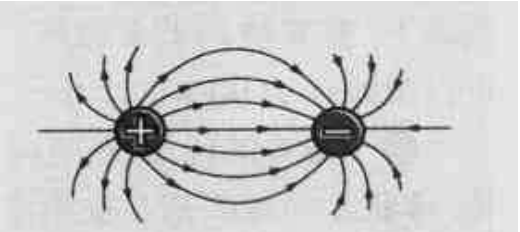


图 1　电场的状态(1)

图 1 示出了两个带电球的电力线互相吸引的状态图。存在电力线的空间称为**电场**。

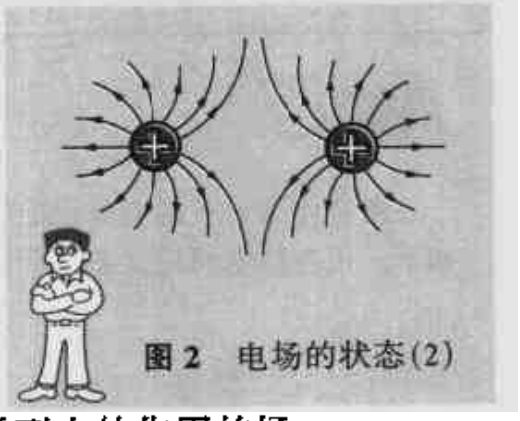


图 2　电场的状态(2)

图 1 表示不同种电荷的情况，同种电荷的电力线分布状态则如图 2 所示，电力线互相排斥。

这样，用这里所讲的电场中电力线的状态也可以非常清楚地解释了 1 所给出的电荷的基本定律。因此，所谓**电**场就是使电荷受到力的作用的场。

电场与磁场是相对应的，对应于磁力线的是**电**力线，而对应磁通量的是电通量，这些都将在以后介绍。

电场就是使电荷受到力的作用的场，电场强度则是在其位置上放置 +1 库[仑][C]电荷时，**电**荷受到电力(正负电荷的吸力或斥力等)作用的大小。这将在下面作详细介绍。



## 电场强度的定义

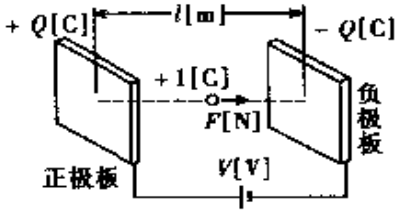



图 3　电场强度

电极间施加电压 $V$[V]时，如图 3 所示，若在两极板间放置 +1[C]电荷，这电荷就与正极板上的 $+Q$[C]电荷相斥，与负极板上的 $-Q$[C]电荷相吸。这样，在两极板间的电场中，电荷受到力的作用，其大小是根据作用到 +1[C]电荷上的力是几牛顿[N]来决定的。这称为**电场强度**。

## 电场强度的单位

### ❶ 由上述定义导出的单位

图 1 中，若 +1[C]电荷受到 $F$[N]力，则这点的电场强度就是 $F$[N/C]。



若在 $E$ 点放置 +1[C]的电荷，则产生 $F=(+1)\times E$[N]这样的力，若对此式进行逆运算，则电场强度 $E=F/(+1)=F$[N/C]，这是根据上述定义推导出来的。

### ❶ 一般使用的单位

对于图 3 所示情况，产生电场是由于在电极上施加了 $V$[V]电压。若极板的面积很大，其电场就形成均匀分布。因此，若极板间距离为 $l$[m]，则每 1[m]所产生的电位 $V/l$[V/m]（称为**电位梯度**、单位为[V/m]）不同。这里，根据电场内产生的电位梯度，用电位梯度表示电场强度 $E$[V/m]。这就是表示电场强度一般使用的单位。

### 也可以通过测量电场强度来衡量电波的强弱

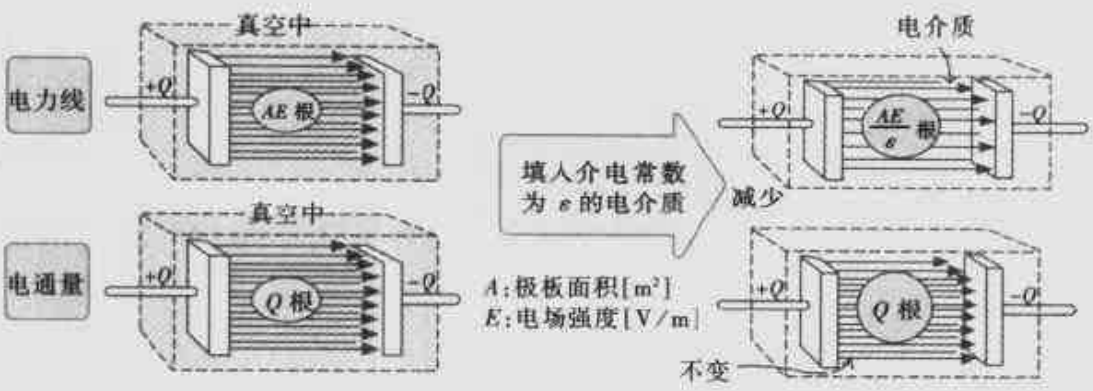
收音机、电视机和其它的无线电通信都存在电波强的地方和弱的地方，各处收听的效果也大不一样。用数量表示就是电场强度。




表示电场强度时，以 1[μV/m]作为 0[dB]，用下式进行计算。

$$20\log\frac{E\ [\mu V/m]}{1\ [\mu V/m]}=20\log E\ [dB]$$

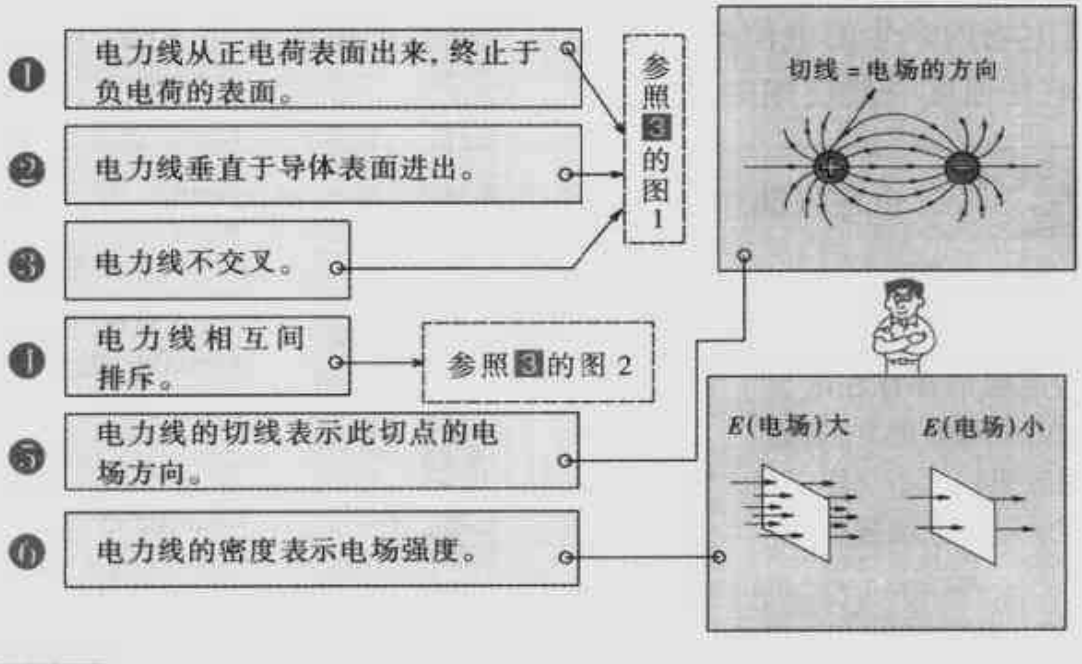
## 4 电力线与电通量




### 电力线的性质

为了表示电场的状态，给出想像的线，一边画出这种线，一边根据这种线说明一些现象。这种想像的线就是**电力线**，另外，还有一种所谓**电通量**。其最大的差异表现在：若构成电场的是介质，则由于介质的介电常数 $\varepsilon$[F/m] 的不同，电力线减少为 $1/\varepsilon$ 根，也就是说，由于介质的不同，即使电荷相同，电力线的根数也是变化的。

电力线用于说明电场的状态，其性质与电通量基本相同，因此，首先，参照插图来介绍电力线的性质。

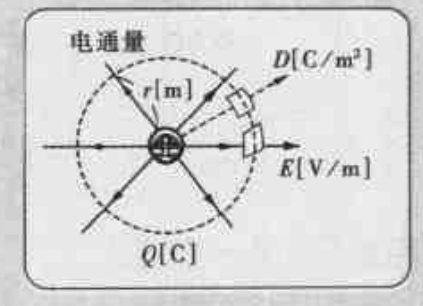


## 电场，电通量密度和电场强度

不管周围空间存在着何种物质（真空也好，介质也好），电通量都应当是从单位正电荷 1[C]发出的 1 根线。因此，单位也用[C]。

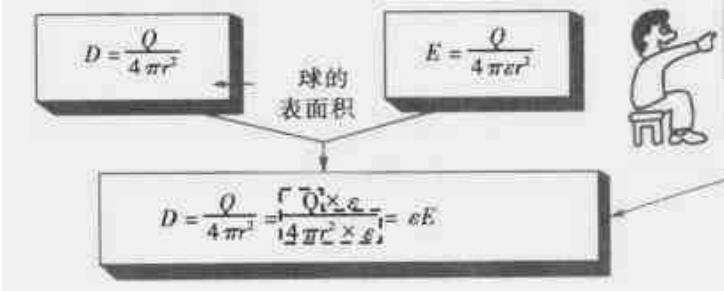
其次，考察从 $Q$[C]电荷发出的面上的电通量密度（每单位面积的电通量）$D$[C/m$^2$ ] 与离开电荷 $Q$[C] $r$[m] 处的电通量密度 $D$，求出面上的电场强度 $E$[V/m]，试推导出两者之间的关系。

这时，若介电常数为 $\varepsilon$[F/m]，由图 1，则有




从 $Q$[C]发出 $Q$[C]的电通量，而且球的表面积为 $4\pi r^2$[m$^2$]

图 1




将电场强度乘以 $\varepsilon$，就可求出电通量密度。

【电通量的性质】 与电力线大致相同，具有下述性质。

- 电通量从正电荷发出终止于负电荷。
- 在电通量发出与到达的地方，存在数值上与电通量相等的电荷。
- 电通量与电力线的方向一致。



Let's try

### 加强计算！

空气的介电常数与真空中介电常数 $\varepsilon_0$ 一样处理，看下述问题，自己考虑并试做一下。

【问题】 试求空气中距离 $+10^{-6}$[C]点电荷 5[m]处的电场强度 $E$ 和电通量密度 $D$。

这里 $\varepsilon_0=8.855\times10^{-12}$ [F/m]。

【解】 计算方法如下

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=\frac{1}{4\times3.14\times8.855\times10^{-12}}=9\times10^9$$

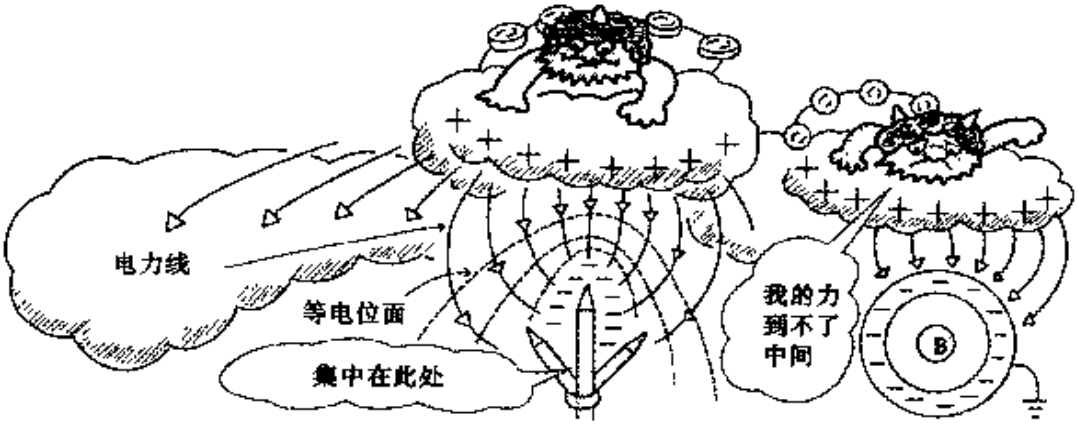
$$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=9\times10^9\times\frac{10^{-6}}{5^2}=\frac{9}{25}\times10^3$$

$$=360\ [\mathrm{V/m}]\cdots\cdots【答案】$$

$$\therefore\ D\approx\varepsilon_0 E=8.855\times10^{-12}\times360$$

$$=3.19\times10^{-9}\ [\mathrm{C/m^2}]\cdots\cdots【答案】$$

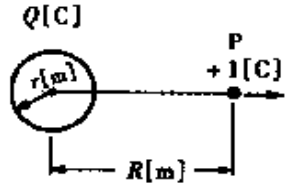
# 5 电位与尖端放电




## “电位”的又一种定义

在第 1 章的2中，将电位与水位作了对比说明，但在空间等情况下，如图 1 所示，1[C] 电荷受到电场强度 $E$[V/m] 方向的力时，电荷就停在此处而具有能量(位能)，这称为电位。

电场是由电荷 $Q$[C] 产生的，因此，电位的高低也用图 1 所示的公式来表示。




P 点电位 $V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$[V]

※ 式中 $\varepsilon_0$ 为真空的介电常数，为 $8.855\times10^{-12}$ [F/m]

图 1　电位

另外，把等电位点连接形成的而称为**等电位面**，在点电荷的情况下，就是以这点为中心的各同心球面。

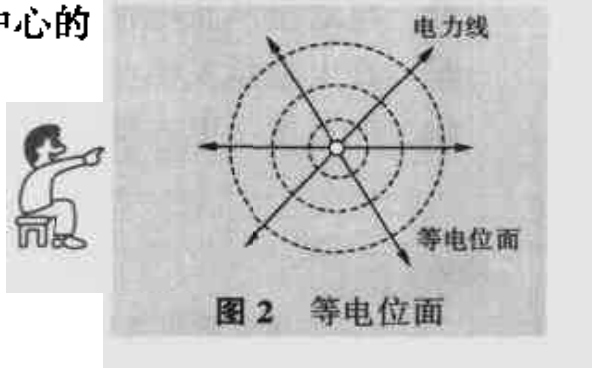



图 2　等电位面

等电位面具有以下性质。

①决不交义，②与电力线垂直相交，③等电位面间隔越窄处电场越强，④导体的表面为等电位面，⑤大地是零电位的等电位面。

对于第①种性质，如果电位不同的等电位面可以相交，那么在交线上的各点处就具有两种电位，这是不合理的。对于第④种性质，导体上的电荷是以静止状态存在。假设各点的电位不同，电荷就会移动，由此保持等电位。在本节开头题图所示的雷雨前的乌云与避雷针的关系的插图中，电力线大量集中于尖端部分，此处电场最强，图中，用虚线表示形成的等电位面，表明间隔越窄处电场越强。



## 尖端放电与静电屏蔽

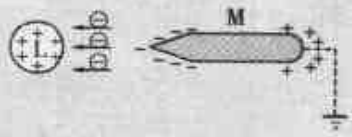


图 3　尖端放电

若非球形物体带电，电荷密度就不均匀，尤其是尖端部分的密度比其它部分都要大。有效利用此原理的是避雷针。即对雷电有最强的引导效果，可以避免雷击造成的灾害。

也就是说，如图 3 所示，L 带正电，若把它接近针状导体，由于静电感应的作用，负电荷集中于尖端。这就使周围空气充满负电荷，与 L 中的正电荷复合而中和。插图中画出的避雷针也就是这种情况，这就是**尖端放电**。但这时因有较大的放电电流流过，所以，需要使用较粗的地线。

其次，如图 4 所示，在带电体 A 形成的电场内，若放置其它的导体 B，就受到静电感应，但若用导体 C 把导体 B 整个地包围起来，则 B 周围空间的电场就消失，即产生削弱电场的效果。但按照现在这样，电场没有受到影响，B 的电位升到与 C 同电位。所以，如图 4 及题图所示那样，如果 C 接地，则 C 的电位变为 0，B 的电位也变为 0。这称为**静电屏蔽**。

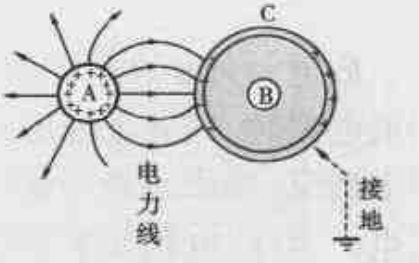


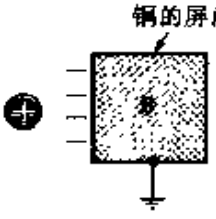
图 4　静电屏蔽



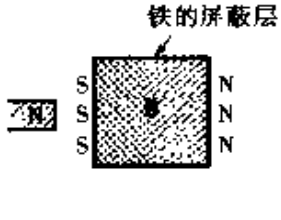
### 各式各样的屏蔽

在无线通信设备中也可以举出很多屏蔽实例。

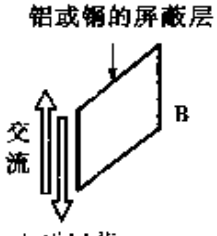
防止一种电路对其它电路的电场或磁场产生影响的方法称为屏蔽。防止的是电场、磁场、交流带来的影响，屏蔽实例如下。



静电屏蔽



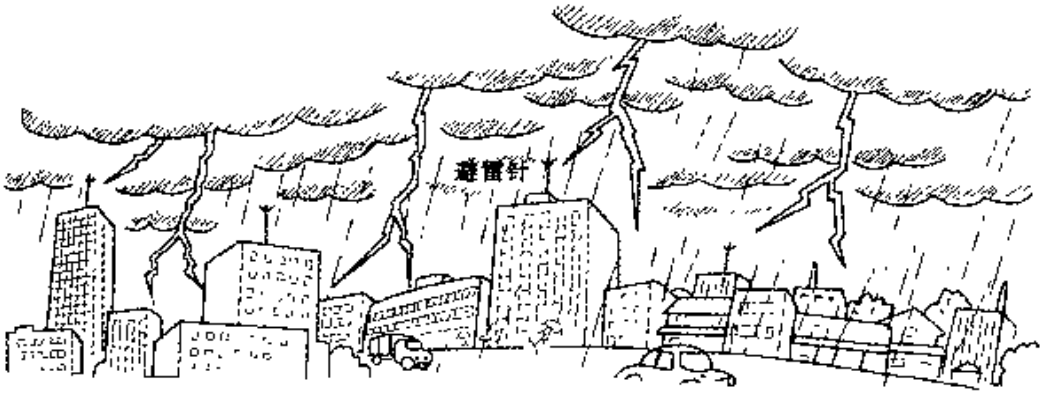
磁屏蔽



电磁屏蔽



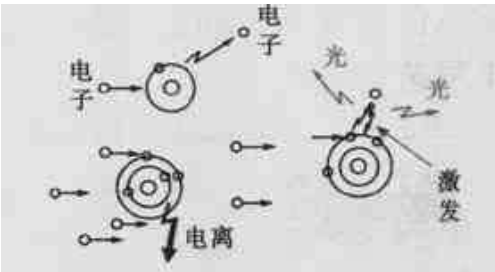
# 6 放电现象




## 放电的机理

放电一词是在8中介绍的电容器中所蓄积的电荷通过电路中的电阻形成电流时，或者电池形成电流时使用的术语。然而这里所说的放电是指以下情况：原来是绝缘体，后来绝缘能力减弱，遭到损坏，致使电流流通的放电。因此，也就如本节开始题图所示那样，夏季等雷雨前形成乌云，其后出现电闪雷鸣，所说的落雷是指部分空气的绝缘变坏而使雷电形成电流通过空气流通，这就是放电的证据。也就是气体的分子或原子受到电子的碰撞，从分子或原子中分离出电子，使得电子数量剧增，发生气体中流过电流的现象，这也称为放电。

图1是这种状态的模式图，电子偏离轨道就是**电离**，偏离途中又返回到轨道称为**激发**，返回时发光。另外，使电子加速的能量的大小用[eV]单位表示。




| | | |
|---|---|---|
| 气体原子的电离电压 | 钠(Na) | 5.12[eV] |
| | 汞(Hg) | 10.4[eV] |
| | 氩(Ar) | 15.7[eV] |
| | 氖(Ne) | 21.5[eV] |
| | 氦(He) | 24.5[eV] |

图1 电离与激发




[eV]（电子伏）是电子物理学中使用的能量单位，1[eV] = $1.60219 \times 10^{-19}$ [J]。相当于在真空中，穿过1[V]电位差时，电子所获得的能量，与SI单位并用。



### 放电的种类

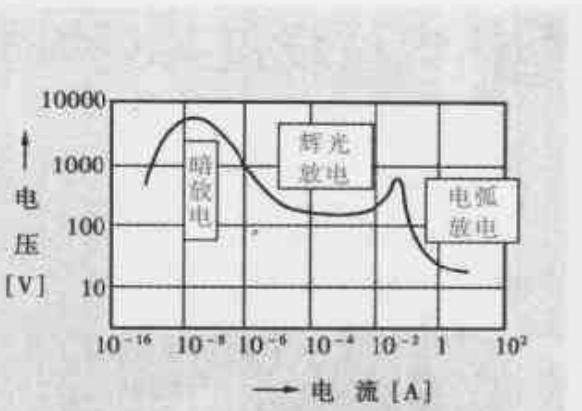


图 2　放电的种类

气体中放电状态的曲线如图 2 所示，**暗放电**状态是指在这阶段，存在少许一些离子与电子，由于这种作用，再加上施加的电场的作用，使离子不断地产生，当经过一定时间离子消失时仍有较小电流流通，称为**暗电流**。而强电场处持续进行局部的电离，对于针形与平行板电极，就在针尖处产生带有亮点的**电晕放电**。若电场很强，就发出声音并产生火花，整个电极发生放**电**（破坏整个电路），就变成**辉光放电**。若再超出这部分，由于电子的碰撞与电离使电子迅速增殖，因电极过热而形成金属蒸气，使这种金属蒸气的原子发生电离，产生过多的电子，形成**弧光放电**，流过几安培以上的大电流。电灯照明就是利用弧光放电的原理。

还有，弧光放电如图 3 所示，开始点燃电极，电极过热时一形成拉弧就进行电弧放电。

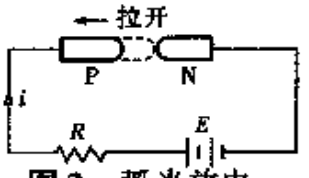


图 3　弧光放电

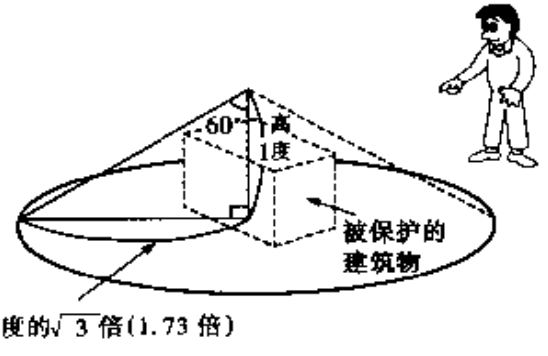
Let's try

### 试设计避雷针的高度

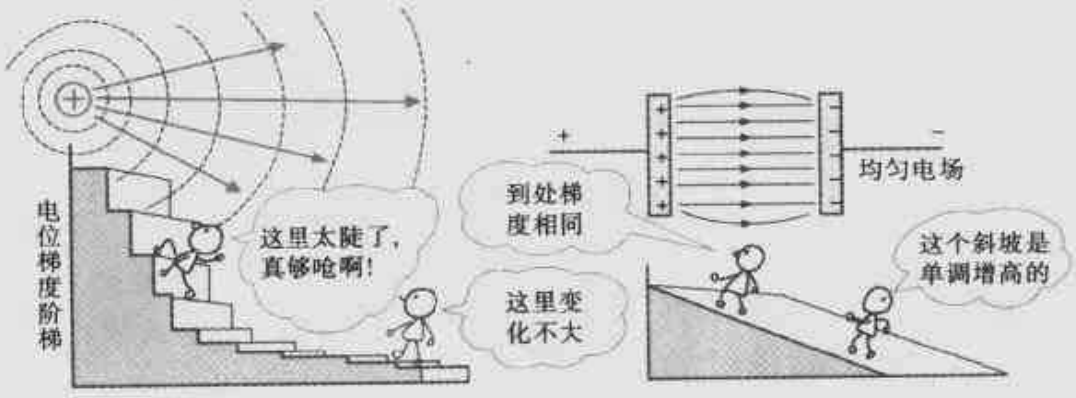


在山间和原野中打雷时躲在低矮处最安全。相反，为了保护高大建筑物，经常采用在其上面树立引雷物体，把落雷引入大地的方法。这种物体称为避雷针。

避雷针的高度最好设计成这样：就是被保护的建筑物要处在与避雷针的针尖垂线成 60°角的空间范围内，此角称为保护角。在危险品多的仓库等地保护角往往改为 45°。



# 7 电位梯度与绝缘能力




**电位随位置不同的变化率是多大？**

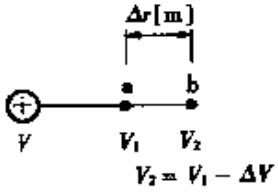



**图 1　电位梯度**

如图 1 所示，若正电荷在 a 和 b 点形成的电位分别为 $V_1$ 和 $V_2$，电位差为 $\Delta V$[V]，则单位长度上的电位变化率称为电位梯度，单位采用[V/m]。

若设 a 点的电位梯度为 $G$[V/m]，ab 间的距离为 $\Delta r$[m]，则可用下式表示：

$$G=\frac{\Delta V}{\Delta r}$$



此式在数值上等于 a 点的电场强度。也就是说，这里重要的是应当明白以下问题：

电力线集中处 ⇨ 电场强度最大处 ⇨ 电位梯度最大

本节开始的题图中，电位梯度陡变处与在电荷附近电力线最密是一致的。

但如题图右侧所示，电场均匀处电位梯度都相等，如果取图 2 那样的值，A、B 间电位差为 $V/2-(-V/2)=V$，因电位差为 $V$[V]，故 $G$，$E$ 分别为：

$$G=\frac{V}{l}\ [\mathrm{V/m}],\quad E=\frac{V}{l}\ [\mathrm{V/m}]$$



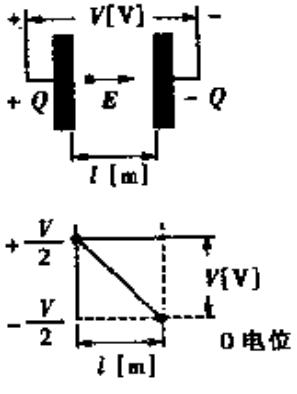



**图 2　均匀电场**



## 绝缘损坏的原因

到现在为止，已经介绍了电位梯度等于电场强度，试考虑电位为何这么重要。即一般地对绝缘材料施加电压时，绝缘是否被破坏不是由材料内部电位高低来决定，而是由电位梯度(电场强度)来决定。

因此，在绝缘物质的击穿试验过程中，从电极施加的电压逐渐增大，直至绝缘破坏，这时的电压除以绝缘材料厚度的值，即这时的电位梯度，称为**绝缘破坏强度**或者**绝缘耐力**。

这时的单位当然是 [V/m]，一般采用 [kV/mm]。表 1 列出这些数值的典型实例。但绝缘耐力也随这时施加的电压上升速率以及时间、材料的状态(温度、湿度、气压)等的不同而异。

表 1

| 物质 | 绝缘破坏强度 [kV/mm] |
|---|---|
| 云母 | 60 |
| 玻璃 | 12 ~ 20 |
| 瓷器 | 34 ~ 48 |
| 胶木 | 10 ~ 30 |
| 橡皮 | 10 ~ 24 |
| 聚氯乙烯 | < 50 |
| 空气 | 3 |

※ 由表可知，空气间距 1cm，施加 30kV 即 3 万伏电压时，绝缘就被破坏。

绝缘破坏时所承受的强度用电位梯度表示，若仅取这时所施加的电压值，则称为**绝缘破坏电压**(又称击穿电压)，这些概念都应记住。

另外，还要牢牢记住两者的不同点。



Let's try

对于在高电压(交流 600V，直流在 750V 以上，7000V 以下称为高电压)条件下使用的设备，进行使用中绝缘不致被破坏的实验。实验方法是怎样的呢?

### 怎样做绝缘耐力的实验呢?

❶下图是实验用变压器的接线图，要用最高使用电压 6900V 的变压器进行实验时，电压表Ⓥ指示的电压是多高呢?

技术基准

对于7000V以下的设备，施加最高使用电压 [E] 的 1.5 倍的电压，历时 10 分钟。

【解】 施加电压为

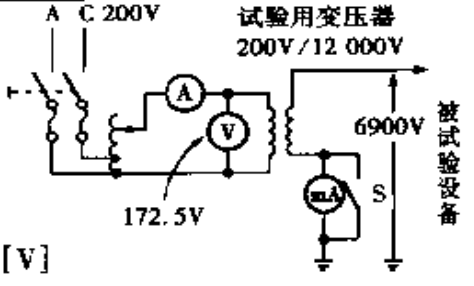
$$6900 \times 1.5 = 10350\ [V]$$

根据匝比 $\frac{200}{12\,000}$

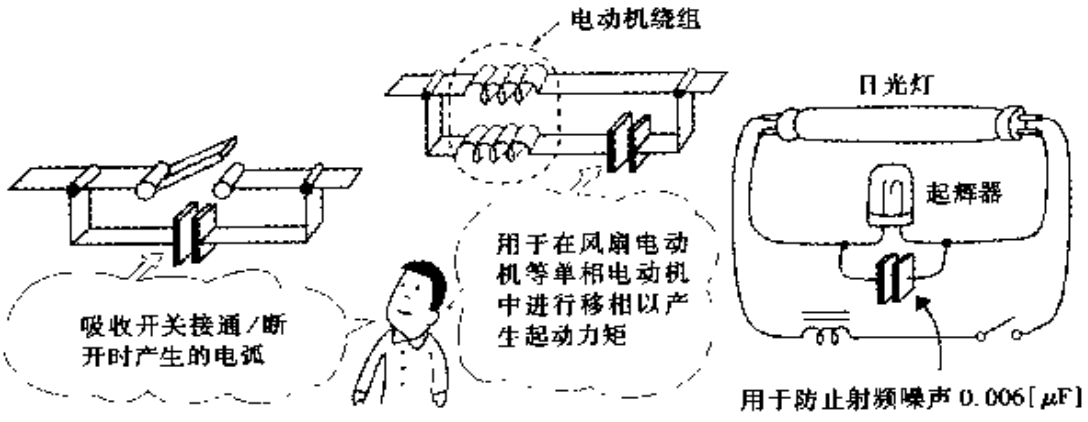
电压表的指示为

$$10\,350 \times \frac{200}{12\,000} = 172.5\ [V]$$





# 8 电 容 器




## 电容器的构造与种类

电容器是一种简单的元件。简单地说，就是在两块导体板之间夹入绝缘物质(也称为电介质)构成的。所以，图形符号就用如题图中所画的两根线来表示。两根线表示两个电极。结构的实例如图 1 所示的纸介电容器，它是在两块铝箔之间置入纸介质，卷绕成圆柱形而构成的。用引线从两块铝箔接到外部电路。

○可变电容器。这是转动轴来改变电容量的电容器。

○微调电容器。这也是一种可变电容器，但是通过微调螺钉来改变电容量。

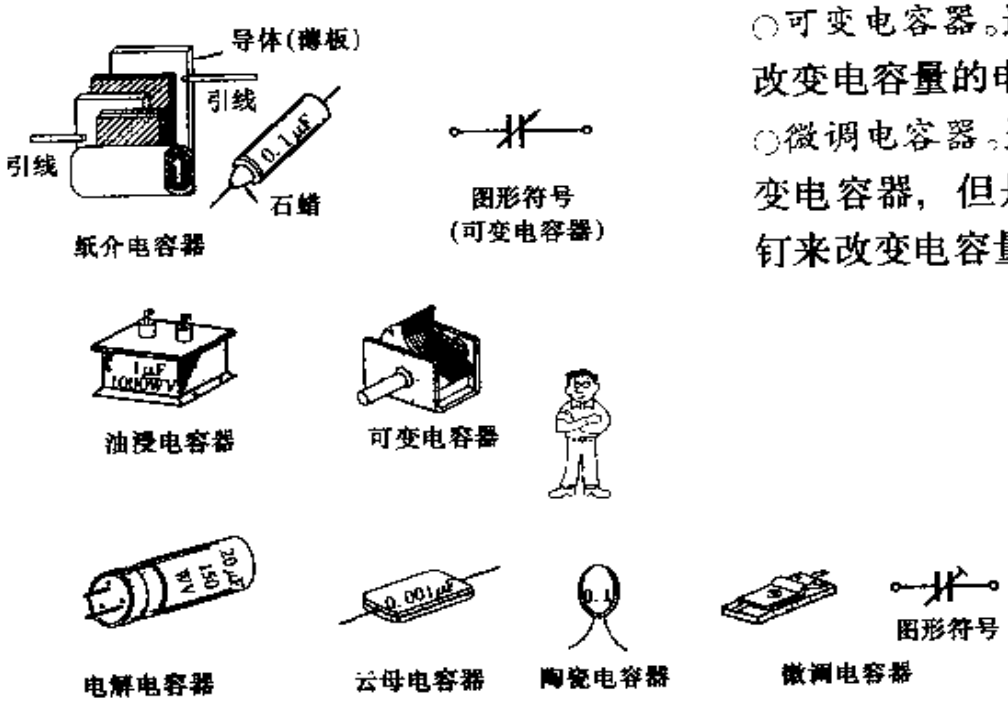



**图 1　电容器的种类**



## 电容器的工作情况

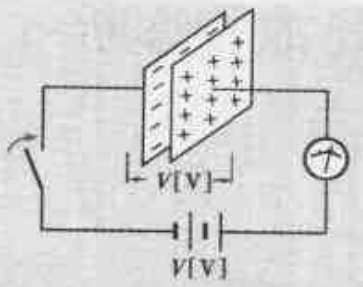


图 2　电容器的工作情况

为了理解电容器的工作情况，需要具有静电的知识。图 2 示出用空气作为介质的两块金属板构成的电容器。电容器接到直流电源时，按照现在这样两块金属板不直接接触，所以，为“开路”状态。因此，可以看到接在电路中的仪表只是在开关接通的瞬间有电流流通。

这是由于电子从电源 - 端流向电容器的一块板极，这些电子与相对侧极板中的电子相斥（同种电荷相斥），这些电子被吸引到电源 + 端。这样一来，即使从电路中把电容器取下来，电容器里面还会有剩余电荷，能量蓄积在电场中。

但这时要注意，直流是不能通过电容器流通的，电容器是隔离直流的元件。电容器的容量即蓄积电荷的能力称为**电容量** $C$，这是以施加 1[V]电压时能蓄积多少电荷（$Q$: 单位为[C]）来表示，单位为[F]，它们之间的关系如下式所示：

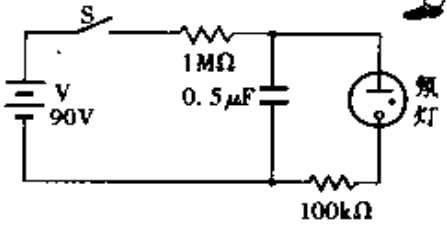
$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow Q = CV$$



### Let's try　闪光灯的制作



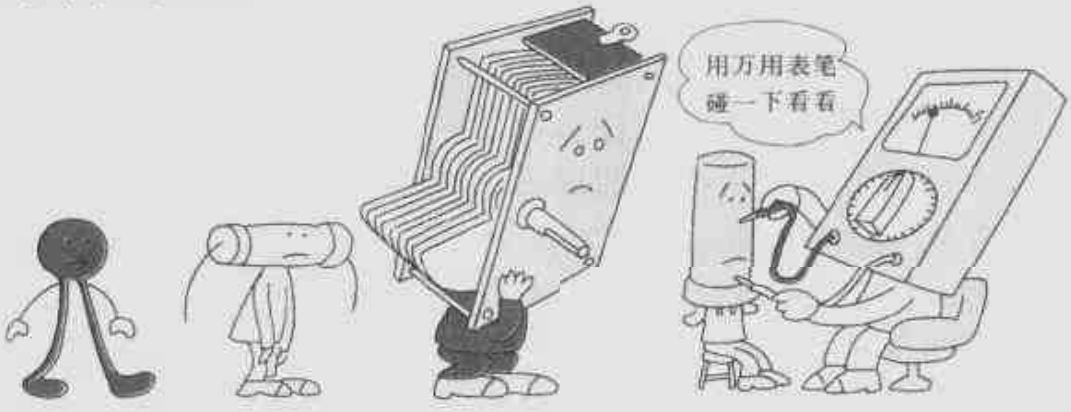
组成右图所示的电路进行有趣的实验。




没有达到一定电压氖灯是不能点亮的。若电压达到“放电电压”，氖灯就被点亮。在电路中，若开关 S 接通，电容器就通过电阻充电，若充电电压升高到氖灯的放电电压，就通过氖灯放电。

重复上述动作，氖灯就断续点亮而产生闪光。重复时间由 $R$ 和 $C$ 的大小决定，这点请参照14。

# 9 故障诊断




## 用万用表测试电容器

电容器有如在8中所介绍的各种类型,其中纸介电容器是在2块铝箔之间夹入绝缘纸卷绕成圆柱形,从铝箔上引出引线,经过浸渍后再用外壳封装或环氧树脂灌封,从而制成电容器。

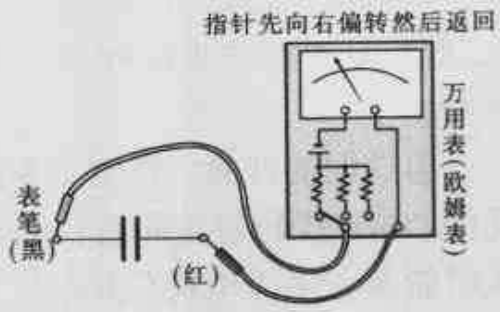



图1 电容充电

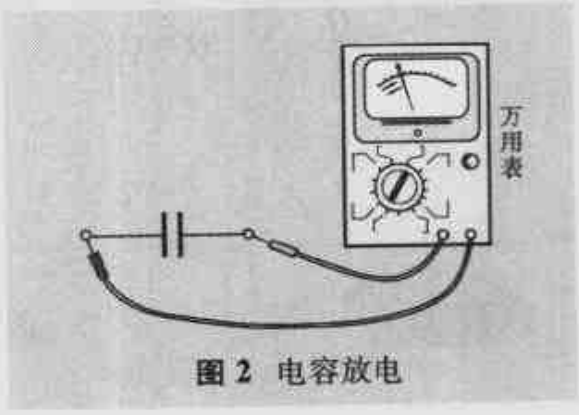



图2 电容放电

如图1所示,将万用表(当作欧姆表使用)的表笔接触到电容器,由于表中电池的作用就看到有电流流通(电荷在铝箔的表面进行扩散)。经过短时间的接触后,电容器上的电压就等于电池的电压(电压上升的趋势如同11中介绍的那样)。

若拿开表笔,则电容器的极板(铝箔)上就蓄积有电荷。这时,蓄积的电荷多少与铝泊的表面积有关(这将在11中介绍)。

若用万用表作为电流表,接触到电容器的端子,则蓄积的电荷就放电,可用仪表来确认这种状态(图2)。

若把所学习的知识归纳一下,就是电容器的一个电极带负电,另一个电极带正电,其间产生电场,两极间是绝缘状态。

## 电容器质量的判断

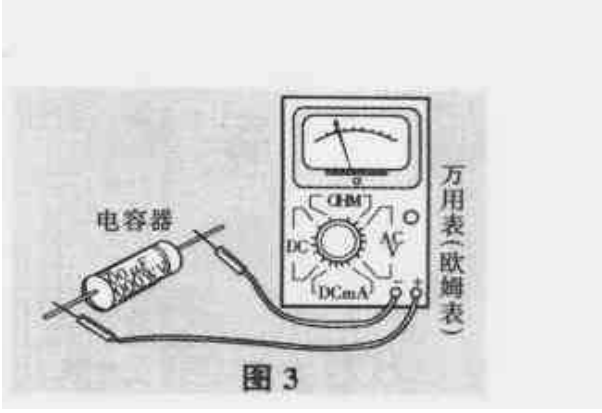


图 3

电容器用于多种电路中，它的质量决定着电路能否正常工作。要学会使用万用表进行检查的方法，怎样判断其好坏，而且坏了会发生什么样的故障。

首先是故障的三种类型：①短路；②接地；③开路。因此，为了用万用表查找这些故障，重要的是怎么判断电容器是好的。

如上所述，万用表作为欧姆表，若接触到电容器的两端（图 3），开始时由于充电，所以有电流流通，随着电容器电压的升高，电流逐渐消失。因此，万用表的指针开始稍有偏转，然后又立即返回原处（表示有无限大的电阻）。若这时拿开万用表，1 分钟后再接触电容器，若电容器是好的，则万用表的指针不偏转（原因是电容器已充电到万用表的电池的电压）。

短路的电容器其内部一部分绝缘遭到破坏，极板相碰，用万用表作为欧姆表，若接触到电容器的引线，则指针偏转到零欧姆。其次，对于开路的电容器，用万用表检查时指针不动，表示不充电，指示无限大的电阻。



### 同一个电容器用于直流时和交流时有什么不同

电容器的品种既有小至几十[pF]的小容量，也有大到几千[μF]的大容量。这里选用的是容量为 0.1μF、耐压为 200[WV]（WV 的含义将在12中介绍），施加交流时也不会损坏的无极性电容器。

首先，如图 a 所示，电容器接直流电源，研究电流流通情况。在开关接通的瞬间，电流表的指针暂时摆动一下然后回到 0A。这表示电容器不能流过直流。其次，研究图 b 所示电容器接交流电源时电流的流通情况。电流表的指针偏转到大约 3mA 处。这说明电容器能流过交流，为什么会有电流流通呢？3mA 的解答参看第 5 章8。

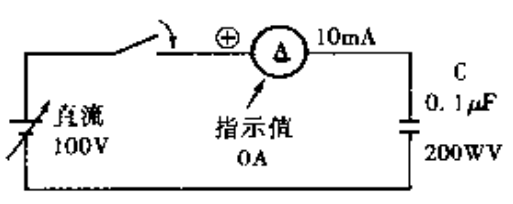


图 a

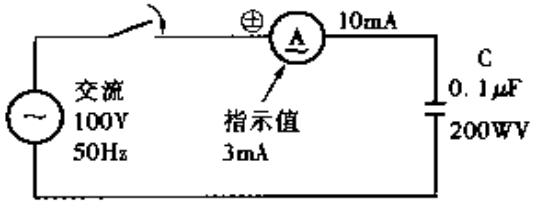


图 b

# 10 电 容 量




## 控制电容量的要素

在图 1 中，若接通开关 S，则电容器蓄积电荷。换句话说，也可以认为是**极板上的电荷扩散**的结果。蓄积的电荷量随电极的**表面积**大小而不同。如果极板宽，电荷扩散的面积也大些，因此，就能蓄积更多的电荷。

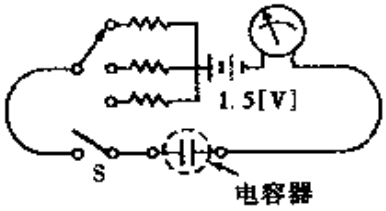



**图 1**

电容量用 [μF] 测量，小电容器或许不到 4[μF]，大电容器或许超过 150[μF]。制造大容量电容器就需要大面积的极板(或铝箔)。

电容量由下述三个要素决定(图 2)。

❶ 介质使用的材料。

❷ 电极的面积。

❸ 电极间的距离。





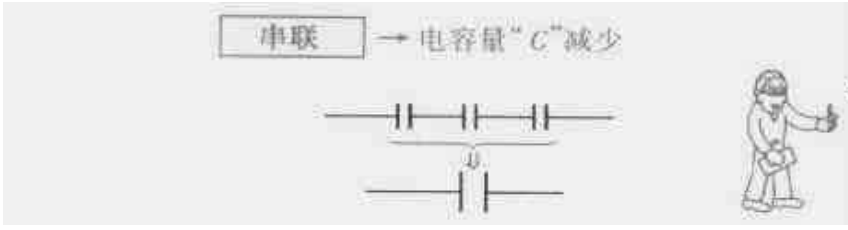
One point

在收音机、电视机和其它电器中使用的电容器，即使切断电源，电容器中仍有剩余电荷。因此，在接触电容器之前要用绝缘螺丝刀使其端子与机壳短路，这一点很重要。

若不注意，这种电压就会损坏测试设备，而且还会对操作者造成严重的电击。

**电容器的不同联接方法能改变电容量吗?**

电容器串并联时，电容量会怎样改变呢?这里再回到前面介绍的内容进行研究。



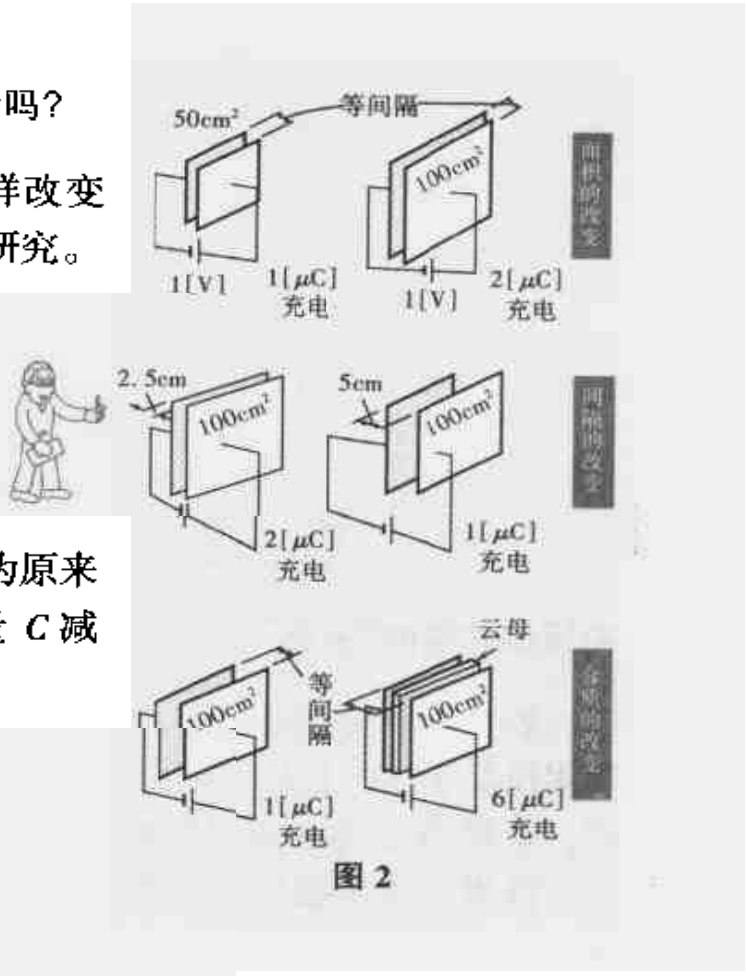
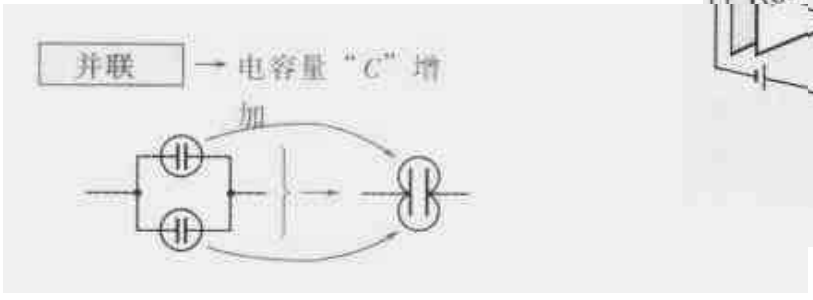




图 2

极板的大小相同，极板间隔增大为原来的 3 倍。(若极板间隔增大，则电容量 $C$ 减少)




极板的大小增大为原来的 2 倍，极板间隔不变。(若极板增大，则电容量 $C$ 增大)



Let's try

**学会诊断(多大为正确呢！)**

对电容器的学习进行小结。

请回答方框中给出的问题。




❶ 电容器的符号是 ➡ $C$

❷ 为了增大电容量使用(三种方法) ➡ 1. 增大极板面积 2. 令极板靠近 3. 改变介质种类

❸ 电容量的计量单位使用 ➡ 法[F]或微法[μF] $\left(\frac{1}{1\,000\,000}\text{[F]}\right)$



# 11 电容器的串并联




## 电容器并联时“求和”

如在11中所介绍那样，电容器可根据不同联接方法改变总的电容量。很多情况下，技术人员使用电容器时，有时要求电容器串联，有时要求并联。这时，牢固掌握电容器串并联后对总的电容量的影响是非常重要的。

这里，试用数学公式研究电容器并联时总的电容量为什么会增加。若在电容器端子间施加电压 $V$ [V]，各电容器上蓄积的电荷为 $Q_1$、$Q_2$、$Q_3$ [C]。

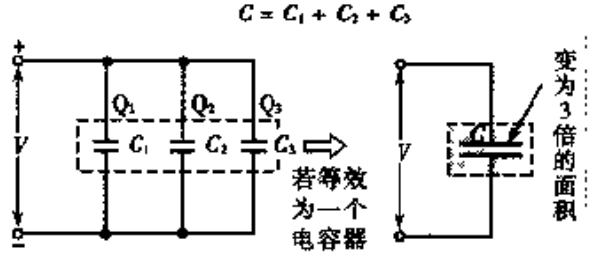



图 1　电容器并联——→ $C$ 增加

$Q_1 = C_1 V$, $Q_2 = C_2 V$, $Q_3 = C_3 V$,

因此，从端子看总电荷为 $Q$[C]，则有

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 V + C_2 V + C_3 V = (C_1 + C_2 + C_2) V$$

由此总电容量 $C$[F]为

$$C = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$



为了记住这个公式，与图 1 的印象联系起来即可（它与计算并联电阻的阻值时正好相反——电阻串联时求“和”——记住此点也可）。

One point　电容器端子电压为 $V$[V]，静电容量为 $C$[F]，这时的电荷 $Q$[C]与它们之间的关系为

$$Q = CV$$



## 若电容器串联，则容量减小

在串联电容器端子 $X$，$Y$ 间施加电压 $V$[V] 时，若以总电荷 $Q$[C] 进行充电，由于静电感应，使得各电容器的电极都产生相同的电荷 $Q$[C]。因此，下述关系式成立：

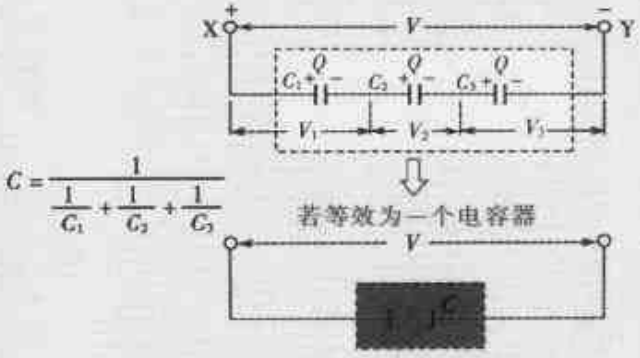



图 2　电容器串联→$C$ 减小

$$V_1=\frac{Q}{C_1}\quad V_2=\frac{Q}{C_2}\quad V_3=\frac{Q}{C_3}$$



又因，$V=V_1+V_2+V_3$，所以，总电容量 $C$[F]为

$$C=\frac{Q}{V}=\frac{Q}{\frac{Q}{C_1}+\frac{Q}{C_2}+\frac{Q}{C_3}}=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}$$

【例题】 3 个 12[μF]的电容器串联时，总容量为

$$C=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}=\frac{1}{\frac{1}{12}+\frac{1}{12}+\frac{1}{12}}=\frac{1}{\frac{3}{12}}=\frac{12}{3}=4\ [\mu F]$$ ……【答案】



### Let's try　电容器串联时的总容量(简便方法)

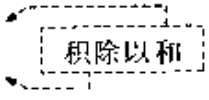
几个电容器串联时，每两个归并在一起进行计算也一样。所以，下面给出计算两个电容器串联时总容量的便于记忆的公式(这种方法已在第 1 章6中讲述电阻并联连接时使用过)。

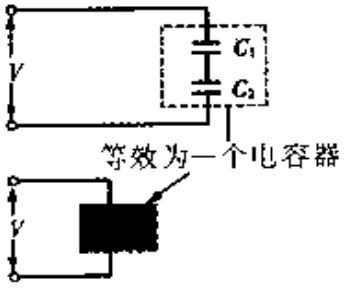


$$C=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}}=\frac{1}{\frac{C_2}{C_1C_2}+\frac{C_1}{C_1C_2}}$$

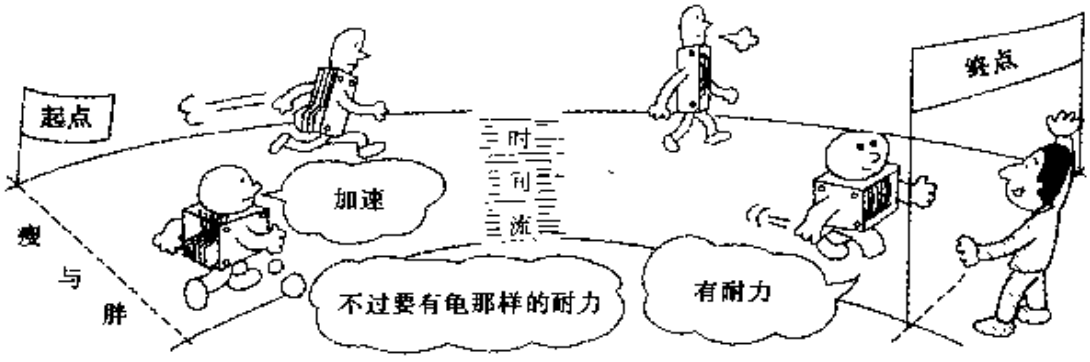
$$=\frac{1}{\frac{C_1+C_2}{C_1C_2}}=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}$$





# 12 电容器的耐压




## 能使用电压的限度

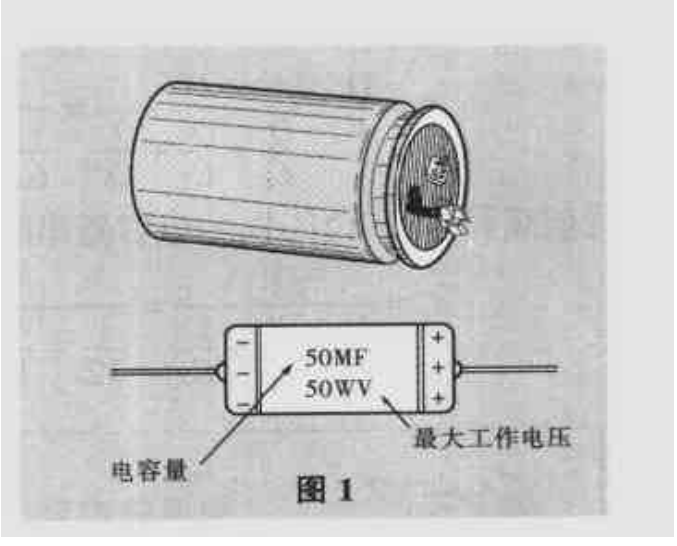


图 1

电容器能使用多高的电压取决于构造的不同。这也就是说，要看电容器中的绝缘物质能耐受多高的电压，如果超出此电压使用，绝缘物质(介质)就会被破坏，引起短路。即变成击穿的状态。在电路中应用时，这也会影响电路的其它部分。因此，使用电容器时，不仅要注意电容器大小(容量)，而且要注意耐压(能使用到多高的电压)，这是非常重要的。电容器的耐压是指施加在电容器上的最高工作电压(D. C. Working Voltage)，缩写为“WV”，要注意理解其意义(图 1)。

另外，电容器使用于交流电路时，这“WV”(耐压)必须超过将在后面介绍的交流电压的最大值。例如，说是 100V 的交流，其最大值为 $100 \times 1.41 = 141$[V]，即使在 100[V]的电路中也希望使用耐压在 141[V]以上的电容器。

也就是说，在高电压处使用的电容器当然要求耐高压，若从电容器方面考虑，可改变置入极板之间的绝缘物质的材料，或者使用厚的绝缘物质。



小电容器上施加高电压

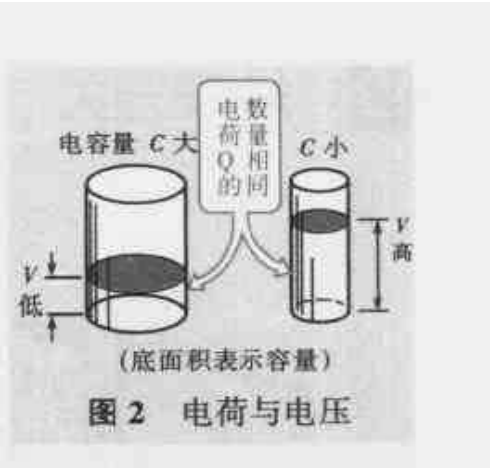


图 2　电荷与电压

所谓“小电容器”是指容量小的电容器，但如在1.1中介绍的那样，电容器串联时每个电容器都积蓄等量的电荷。这种情况下，电压如何考虑呢？如图 2 所示，在容量较小的电容器上施加的电压较高。若用公式推导，如下所述。

图 3 中每个电容器都是相同的电荷 $Q$，所以，由

$$Q = C_1 \times V_1 \quad 及 \quad Q = C_2 \times V_2$$

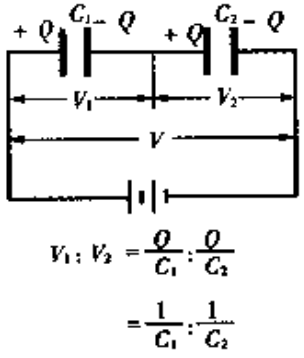
有

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

由图可知，电压的关系为 $V_2 = V - V_1$，因此，就变成

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times (V - V_1)$$






$$V_1 : V_2 = \frac{Q}{C_1} : \frac{Q}{C_2} = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2}$$

图 3　电压的施加方式

此式改写为

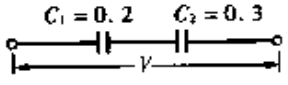
$$V_1 = \frac{VC_2}{C_1 + C_2} \quad 同样 \quad V_2 = \frac{VC_1}{C_1 + C_2}$$

(现假定 $C_2$ 的容量小，$V_1$ 是加到容量大的 $C_1$ 上的电压，所以 $V_1$ 值较小)

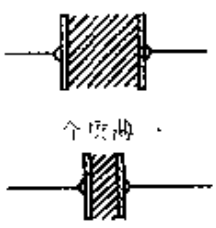
由此可知，电容器串联时各自的**电压与电容量成反比**。这样，使用电容器时，要很好地理解电压的施加方式，这是非常重要的。下面在“let's try”中具体地试做一下。

Let's try

有两个耐压 500V 的电容器。容量分别为 0.2μF 和 0.3μF，若两个电容器串联，其两端施加的最高电压是多大？




容量与耐压

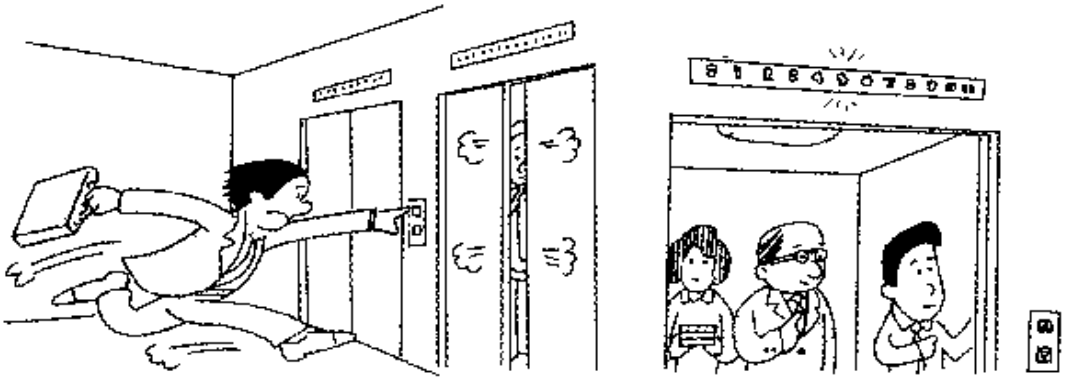



【解】因为所施加电压与容量成反比，所以，小容量电容器 ($C_1 = 0.2\mu F$) 可以施加 500V 电压，可计算两端所加的最高电压：

根据 $V_1 = V \times \frac{C_2}{C_1 + C_2}$，则有 $500 = V \times \frac{0.3}{0.2 + 0.3}$

$$\therefore \quad V = 500 \times \frac{0.5}{0.3} = 500 \times \frac{5}{3} \approx 833\ [V] \cdots\cdots【答案】$$

# 13 触摸开关



## 电与人类

看一下安装在自动电梯门旁的墙壁上的开关吧。我想起最近经历过的事情：手刚一接触开关，特别是还没用手指按下开关，绿色氖灯就“突然”亮起来。

另外，自己身体有时也成了电路的一部分，能真正地体会到是否真的完成了这电路的功能，虽说是仅暂时摸到电梯的按钮开关，实际上是人体接地，人体具有负电荷，利用的就是这种理论。

这就是所说的触摸开关。若电容器充电，则其中一个电极获得 + 电荷，另一个电极获得同等量的 - 电荷。若人体（具有负电荷）成为电容器的一个电极，相对侧就应获得 + 电荷。电路中接入两个电容器，可知，若改变一个电容器上的电荷，另一电容器上的电荷也改变。因此，如图 1 所示，若触到电梯的召唤按钮（实际为触摸开关），人体就起到电容器的一个电极的作用，$C_S$ 充电，因此，$C_1$ 也充电，$C_1$ 上就呈现出电压。

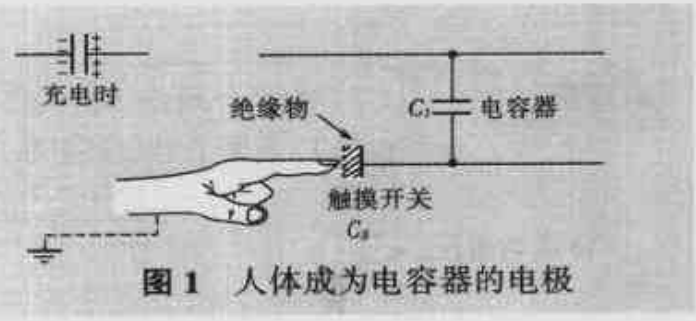


图 1　人体成为电容器的电极

也有使用 CMOS 型 IC 的触摸开关，其原理就是，若人体接触到金属片，则人体就作为天线感应出 50Hz（或 60Hz）的电源交流信号，通过高输入阻抗的 CMOS 进行放大，对电容器进行充电。

## 氖灯点亮的原理

由上述可知，人体成为电路的一部分，因此，试根据图 2 研究电梯的灯为什么会点亮。此灯为氖灯，氖灯上的电压没有达到一定的数值以上是不会点亮的。

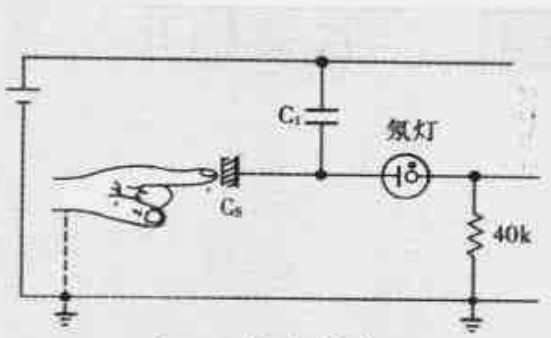



图 2　氖灯点亮

若手接触到开关，首先是 $C_1$ 充电，产生电压，此后若该电压上升到某电压以上，则氖灯就被点亮*。

图 3 是图 1 和图 2 的工作原理的实际应用，用氖灯告知有人在某层楼召唤电梯，而为了把此情况告知电梯，如图 3 所示那样，还要增加一个要素 SCR(一种晶闸管)。SCR 的门极 G 若流过电流，A、K 间就会有电流流通。因此，若来自 $C_1$ 的电流流过 G 极，SCR 就导通，使直流电动机转动，把信号送到电梯。

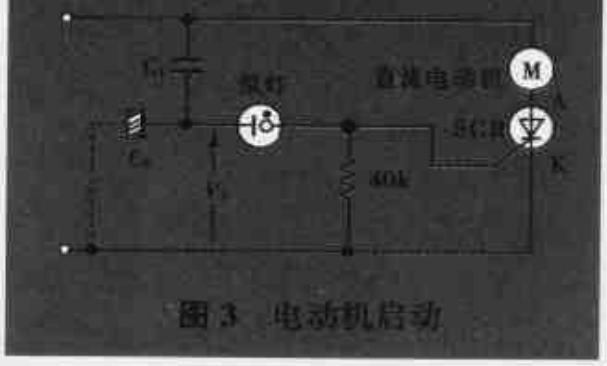


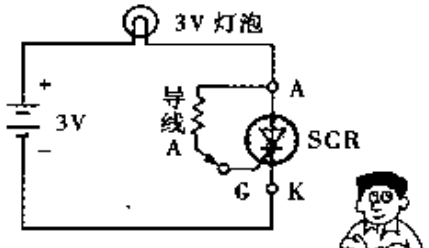

图 3　电动机启动

### SCR 工作原理



具有阳极 A，阴极 K，门极 G 的三端子器件不能反向流过电流，这种器件称为 SCR。

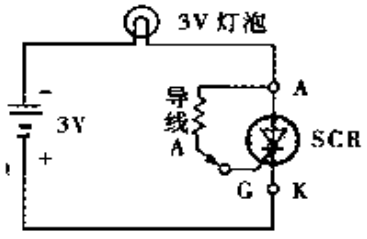
这里，试通过实验研究 SCR 的工作原理。




电路中若导线 A 连到 G 极，将如何呢？

(SCR 导通，灯泡点亮。)






电路中若导线 A 连到 G 极，将如何呢？

(SCR 不导通。因为 SCR 为反向偏置。)

* 这样的描述似不够确切。应改为：手接触到开关后，$C_1$ 与 $C_S$ 同时充电，当 $C_S$ 上的电压上升到一定电压以上时，氖灯就被点亮。——校者注

# 14 电容器的充放电




## 若获得电荷就形成对抗力

如图 1 所示，能蓄积电荷的电容器若接到电源上，将获得与电容量大小相对应的电荷，在其上积蓄的电荷形成电压，这电压与电源相抗衡。

因此，若电容器上的电压等于电源电压，电荷就停止移动，暂时的电荷移动称为**过渡现象**。起初电容器上没有电荷的积蓄，所以移动的电荷非常多，随后移动的电荷逐渐减少。与此相反，电容器上建立的电压起初为零，随后逐渐升高，升高到等于电源电压为止。

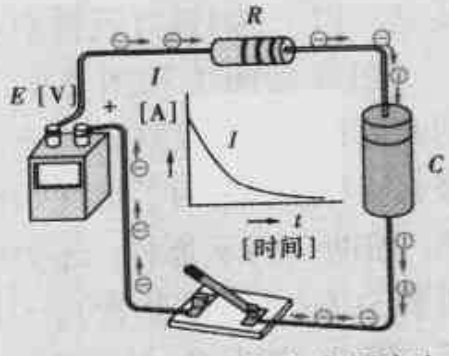



图 1　电荷移动使电容器充电

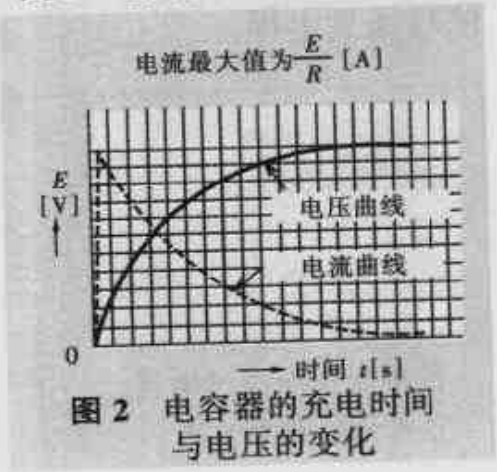



图 2　电容器的充电时间与电压的变化

将这种状态画成曲线如图 2 所示。由曲线可知电压 $V$ 逐渐升高。当电容器电压为高的状态时，若断开图 1 中的开关，则电容器照原样保存这些电荷。这就像电池那样，也可利用电容器暂存的电荷形成短暂的电流流过，但电流会很快减少到零。

## 63.2% 和 5 倍是多少

对于图 2 所示充电曲线，电压升高到一定数值的时间与电路的 $C$[F] 和 $R$[Ω] 的大小有关。这个 $CR$ 值以[秒]为单位，从接通电源起算，经过 $CR$

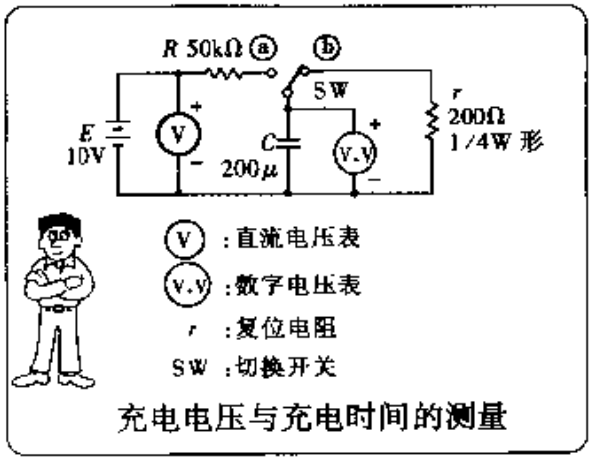


[秒]的时间，电压就达到曲线最终高度的 63.2%。因此，这 $CR$ 值变成电压变化的目标。而且，由此可知，若到了这 $CR$[秒]的 5 倍时间，即在 5 $CR$[秒]时，曲线的变化达到最终值的 99%。



## 电容器充放电的实验

测量电阻 $R$ 和电容器 $C$ 构成的电路的充电时间与电压的变化，以及放电时间与电压的变化。



充电电压与充电时间的测量

❶ 开关 SW 扳到ⓑ侧。

❷ 在 SW 扳到ⓐ侧的瞬间，秒表开始记时，测量数字电压表 V.V 指到 2[V]的时间，记入下表中。

❸ SW 再扳到ⓑ侧时电容器上的电压变为零。

❹ SW 再扳到ⓐ侧，用秒表测量 V.V 指到 4.5V 的时间。

❺ 同样，SW 再扳到ⓑ侧，电容器上电压变为零，再切换到ⓐ侧，用秒表测量上升到目标电压的时间。重复上述操作填入下表。

| 电容的电压 [V] | 0.0 | 2.0 | 4.5 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 9.5 | 10.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秒表读数 [s] | 0.0 | | | | | | | | |



其次，改变上图中的 $R$ 和 $r$，测量放电电压的变化和时间。

❻ 首先 SW 扳到ⓐ侧，电容器上的电压 V.V 充电到 10[V]。

❼ 用秒表测量 SW 扳到ⓑ侧后降到目标电压的时间。重复❹、❺的操作填入下表。

| 电容器的电压 [V] | 10.0 | 7.0 | 5.0 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秒表读数 [s] | 0 | | | | | | | | |

根据以上两张表的数据画出曲线，将画出的曲线跟下页的小结相对照。



# 本章小结



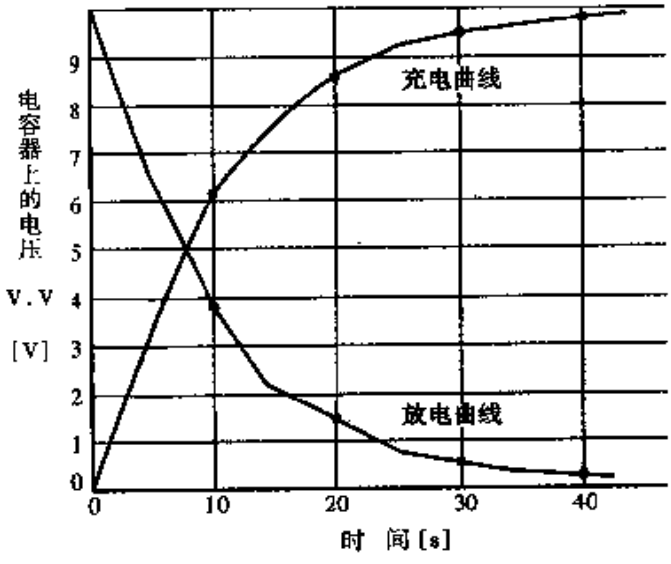
在1-4的“let's try”中，改变 $C$ 和 $R$ 数值的组合进行实验。若这样做，请每隔 1[V]测量电容器上的电压(V.V)。$C$ 和 $R$ 的组合实例如下表所示：

| 电阻值 $R$ [kΩ] | 50 | 50 | 50 | 100 | 100 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 电容量 $C$ [μF] | 200 | 400 | 1000 | 100 | 200 | 500 |
| 计算 $R \times C$ | 例 10.0 | | | | | |



1. 计算上表的 $R \times C$ 值。
2. 按照 $R$ 与 $C$ 的各种组合进行实验，试画出曲线。
3. 在各自的曲线中，经过 $R \times C$[s]时间后电容器上的电压(V.V)是多少[V]。

这条曲线对应于上表中有(例)字的那一组数据。经过 10[s]后充电曲线上升到最终值的 63.2%。




4.

电路中常用的电容量以[μF](1[μF] = $10^{-6}$ [F])和[pF](1[pF] = $10^{-12}$ [F])为单位表示其大小。



【问题】 电容量为 30[μF] 的电容器上施加 20[V] 的电压，求出该电容积蓄的电荷 $Q$[μC]，把适当的数值填入下述的( )中。

【解】 $C = (\quad)$[μF] = $(\quad) \times 10^{(\quad)}$[F]

$Q = CV = (\quad) \times 10^{(\quad)} \times (\quad) = (\quad) \times 10^{(\quad)}$[C] = $(\quad)$[μC]

(答案) 上述( )中依次填入 30, 30, $^{-6}$, 30, $^{-6}$, 20, 600, $^{-6}$, 600





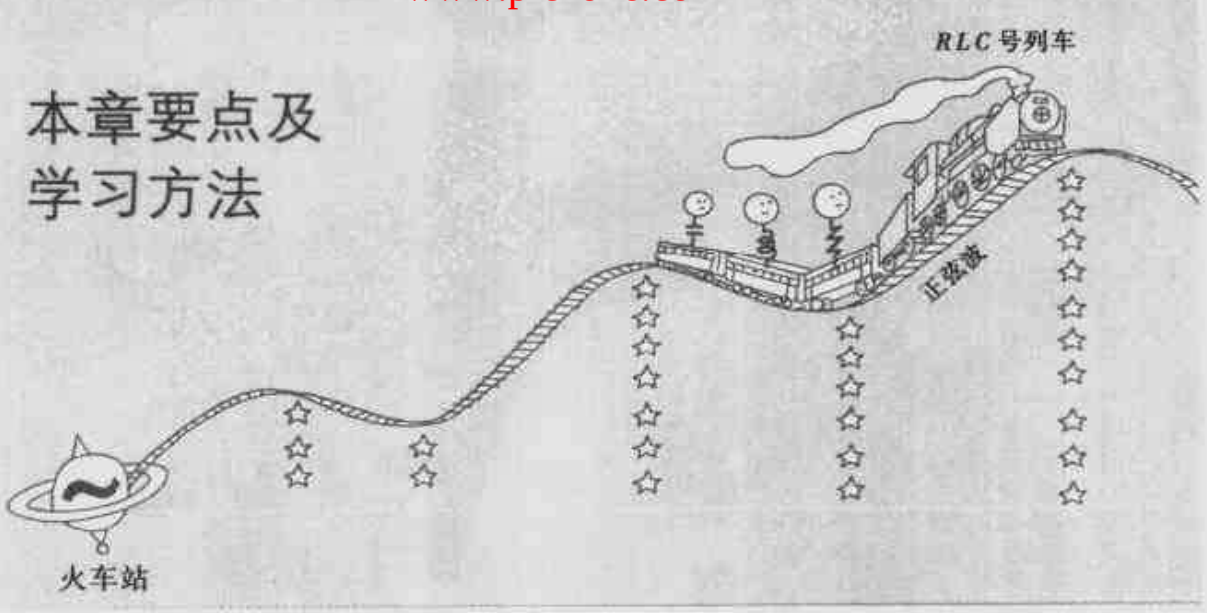
# 5 交流电基础




## 远距离输电实验



# 本章要点及学习方法



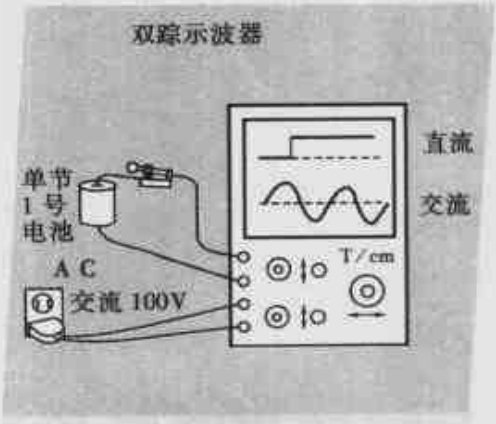

电的形式大致分为三种，即电池那样的**直流**（DC: direct current）电，经电线传输的**交流**（AC: alternating current）电，还有一种，以电话为例，是拨号产生的**脉冲**（数字信号）形式。

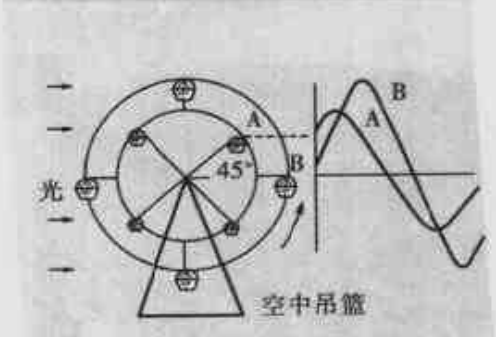
本章学习有关交流电的基础知识。在示波器上显示的交流电波形对时间轴来说是周期性地正负变化的波形。

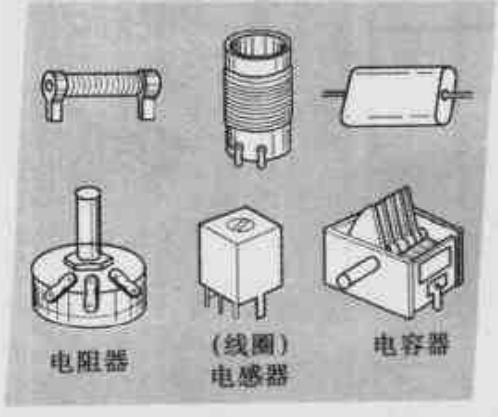
那么，这种交流电是如何产生的呢？请看一下空中吊篮的座舱 A 和 B。来自左方的光照射座舱时就出现影子，在座舱转动的同时，影子就描绘出 A 和 B 的波形。

空中吊篮转 1 圈，即旋转 360°。这时 A 和 B 波形也经历了 1 个周期，因此，波形的横轴可用角度来表示，若吊篮的转速加快，1 个周期波形的时间就会缩短，波形的横轴当然也可以用时间来表示。这样的波形称为**正弦交流**，电学上用交流发电机或振荡器就能产生交流电压。

交流电的工作负载有电动机及电热



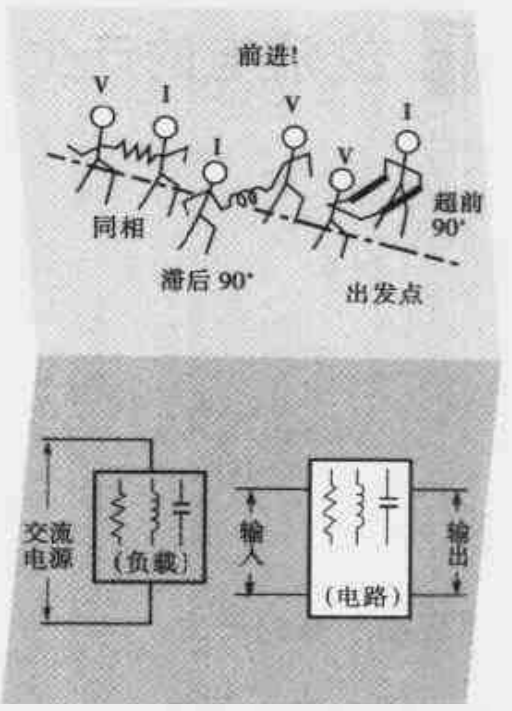



器等，种类之多不胜枚举，但若按阻抗性质分类有 $R$(阻性负载)、$L$(感性负载)和 $C$(容性负载)(电子管和晶体管除外)。

在交流电路中，电阻 $R$，电感 $L$ 和电容 $C$ 是如何工作的呢（工作情况与直流不同)?

在实际的交流电路中，除了单独使用各种元件外，还可以由各种元件构成组合电路。

交流电路的计算采用矢量，但要熟练掌握其计算方法就得学习。




## 本章要学习的内容

正弦波是什么样的波形，如何用符号来表示它的瞬时值?正弦交流的有效值与平均值。

研究瞬时值的角频率、频率、周期、波长等，以及它们彼此的关系。






瞬时值的表达式与计算都比较复杂，最简单的计算方法是什么?这部分说明交流计算的最佳方法，以及交流矢量的有关问题。

对交流电路进行计算时。由于阻抗、电压和电流都是矢量，因此，即使在仅需计算数值大小的场合，也要画出矢量图认真计算。



电感与电容组合产生 $LC$ 谐振现象，这是电学上最有趣的现象。



# 1 交流电的产生




## 感应电动势的产生

图 1 中，若将磁场中的导体朝着靠近自己的方向快速地移动，则在导体中就会产生**感应电动势**。磁场与导体受力的方向以及感应电动势的方向可按**弗莱明右手定则**来确定。

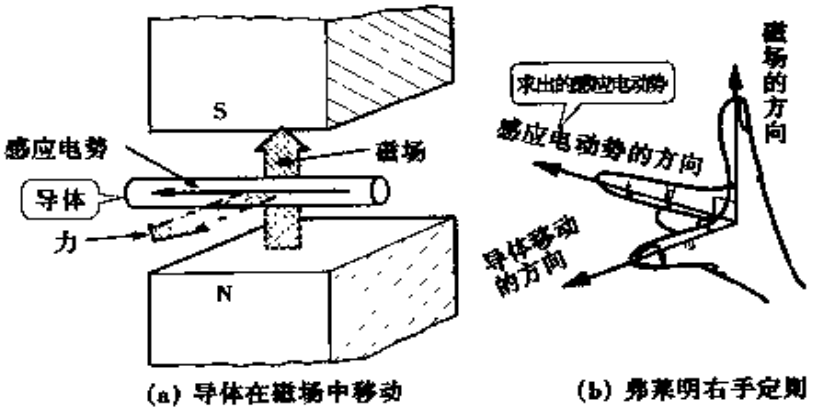



图 1　感应电动势的产生

## 交流电压产生的秘密

本节开头插图中秋千摆动方向与检流计指针偏转方向之间的关系如图 2 所示。也就是说，秋千荡到左右的最高处，因此处无磁场所以就不产生感应电动势。秋千荡到最低处时，因切割最大磁通，所以产生最大感应电动势(电压最大)，这一电压使检流计指针偏转。由图 2 可以看出，这不是纯交流电波形。为了产生正确的**正弦交流电压**，要像图 3 所示那样在磁铁中转动线圈。以 A 点为出发点，并设其为 0°。

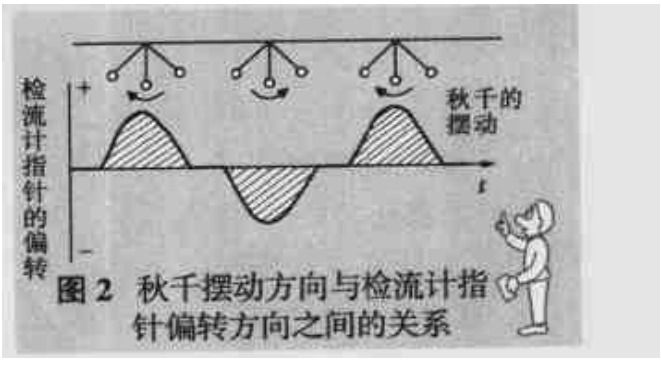



图 2　秋千摆动方向与检流计指针偏转方向之间的关系

线圈转到 90°即 B 位置时，切割最大磁通，因此感应电动势为最大值

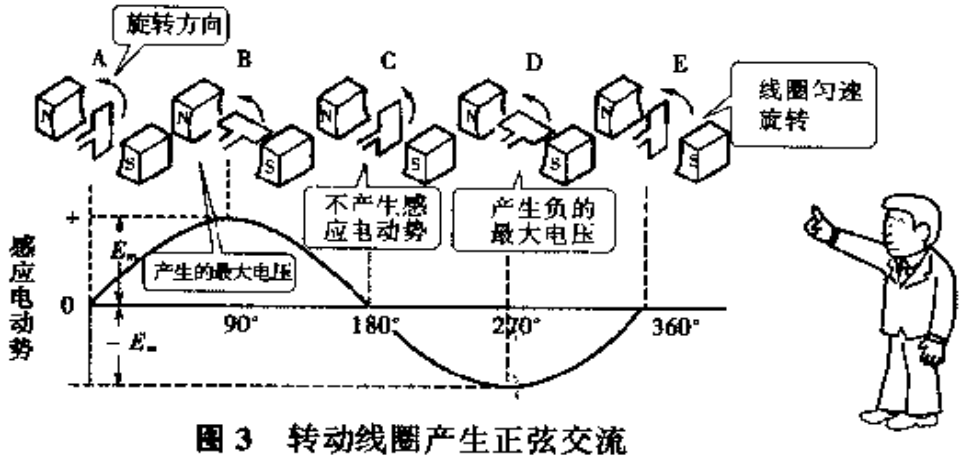



**图 3　转动线圈产生正弦交流**

$E_m$。转到 180°时因不切割磁通，所以感应电动势为 0，转到 270°即位置 D 时，感应电动势为负的最大值 $-E_m$，而 E 点也就是 A 点。由于线圈作匀速转动，因此感应电动势(电压)在每时每刻地改变着，称为正弦波形的**瞬时值**。这就是说，图 3 的波形也用**时间轴**表示。1 次循环所经历的时间用**周期** $T$[s]来表示，若每秒的循环次数为**频率**[Hz]，则它们之间的关系为 $T=1/f$[s]。

One point

周期与频率是倒数关系，试对下述数值进行换算。

$$f=400\ [\mathrm{Hz}]\rightarrow T=\frac{1}{f}=\frac{1}{400}=0.0025\ [\mathrm{s}]=2.5\ [\mathrm{ms}]$$

$$T=0.02\ [\mathrm{s}]\rightarrow f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0.02}=50\ [\mathrm{Hz}]$$

频率的单位曾经采用[c/s](周/秒)，但现在采用[Hz](赫)。



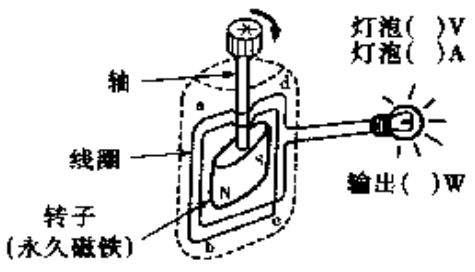
Jetstry

## 自行车用交流发电机



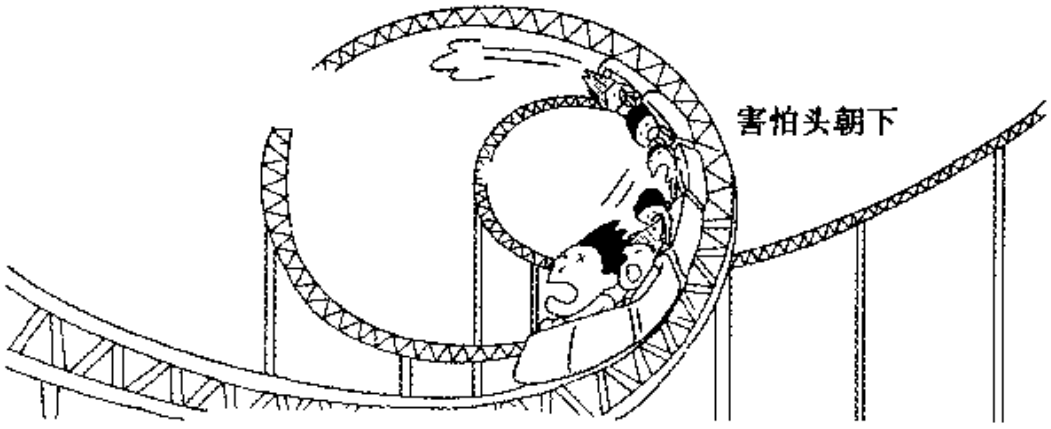
自行车用发电机是一种常见的交流发电机。由右图可知，若转动磁铁，线圈 ab 和 cd 就切割磁通，从而产生感应电动势。

读者不妨观察一下家中自行车用的发电机的输出功率是多少瓦，灯泡的电压是多少伏，电流是多少安。




发电机的构造

# 2 角频率与瞬时值




### 角频率与线速度

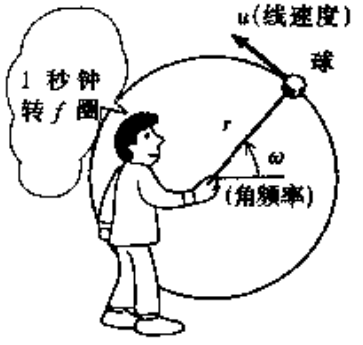



图 1 转动小球

图 1 是在半径为 $r$[m] 长的线绳上系上一个小球，每秒转动 $f$ 圈。对于作圆周运动的小球来说，可采用**角频率**和**线速度**来表示其速度。电学上采用的是角频率 $\omega$，也称为角速度。

$\omega = 360°$（圆的角度）× 每秒的转动次数 $f$[度/秒]

电学上采用与 360°(**60 分法**)等同的**弧度法** $2\pi$[rad](弧度)。另外，每秒转动次数 $f$ 就是频率 $f$，因此，角频率 $\omega$ 可表示如下：

$$\omega = 2\pi f \text{[rad/s]}$$

还有一个参数就是线速度 $u$，它表示物体作圆周运动时的圆周切线速度，若以翻筋斗的过山车为例，就是表示座位处的圆周切线速度。

**线速度 $u$ = 角速度 $\omega$ × 半径 $r = 2\pi fr$** [m/s]




弧度与度数的换算是比例关系，因此，可用下式代换求得：

25 [度] → $x$ [rad] $\quad \frac{25}{360} = \frac{x}{2\pi} \rightarrow x = 0.436$ [rad]

0.2π[rad] → $x$ [度] $\quad \frac{x}{360} = \frac{0.2\pi}{2\pi} \rightarrow x = 36$ [度]





## 正弦波的瞬时值

对于图 2 所示的发电机，导体 $\overline{ab}$ 处于 0° 的位置，以速度 $u$ 作匀速转动。导体 $\overline{ab}$ 最大地切割 N 极的磁通的位置为 $\theta = 90°$。根据第 3 章11中所学习的知识，这里 $\overline{ab}$ 产生的感应电动势 $v$ 为

$$v = B\overline{ab}u\sin\theta \ [\mathrm{V}]$$

这里试考虑角度 $\theta$，$\theta$ = 角频率 $\omega \times$ 时间 $t$，因此，

$$\theta = \omega t = 2\pi ft \ [\mathrm{rad}]$$

电刷 A 与 B 之间的电压瞬时值 $v$ 为

正弦

瞬时值 = 最大振幅 × (角速度 × 时间)

$$v = V_m \times \sin(\omega t) \ [\mathrm{V}]$$

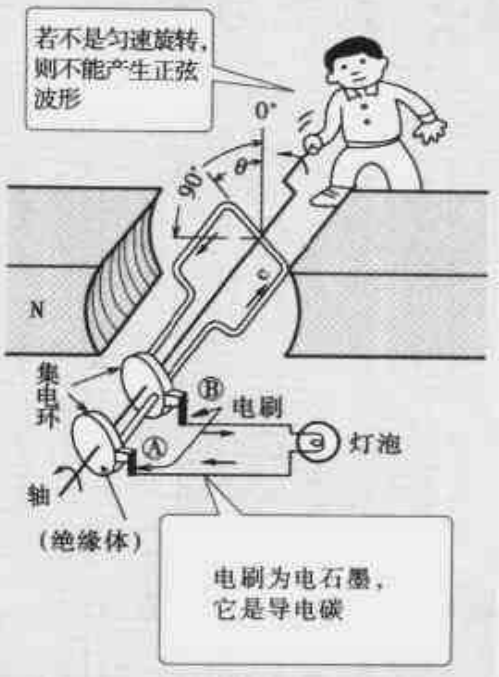



图 2　正弦交流的产生

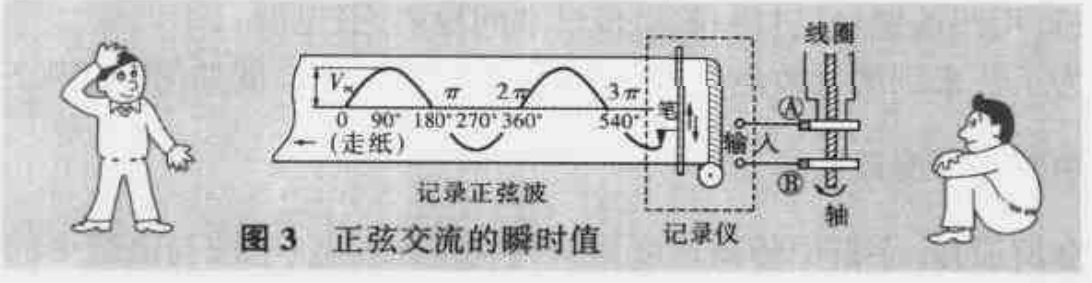



图 3　正弦交流的瞬时值

### Let's try　过山车的速度



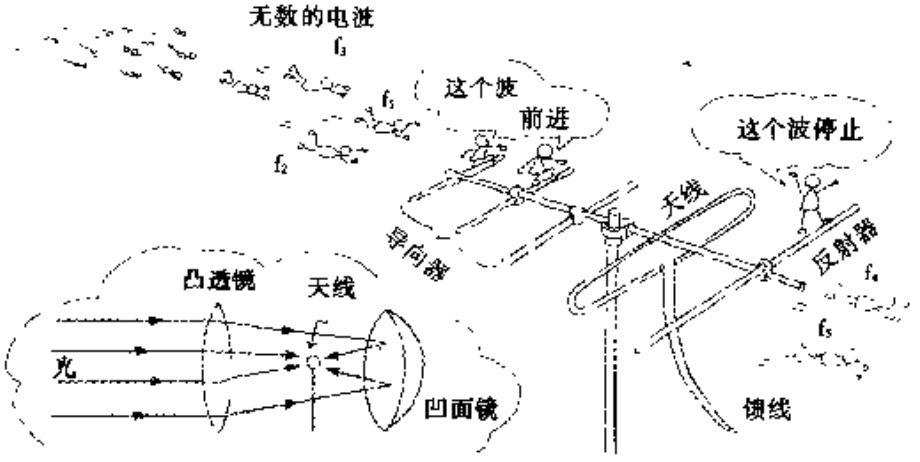
这里试计算一下过山车的速度。若车的直径为 16m，转一圈的时间为 2.5s，试求(1)频率 $f$，(2)角速度 $\omega$，(3)线速度 $u$。

【解】 (1) $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{2.5} = 0.4 \ [\mathrm{Hz}]$　(2) $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 0.4 = 2.51 \ [\mathrm{rad/s}]$

(3) $u = \omega r = 2.51 \times \dfrac{16}{2} = 20 \ [\mathrm{m/s}] = 72 \ [\mathrm{km/h}]$

(时速 72km/h 为平均速度。实际的过山车轨迹不是真正的圆形，而是椭圆形。当然，圆顶处的速度最慢，圆底处的速度最快。)

## 3 频率与波长的关系




收集电波的电视天线

在由前方短而越到后方越长的铝管构成的电视天线中，收集电波的天线就位于馈线连接的铝管处。天线前面的铝管称为**导向器**，后面的铝管称为**反射器**。原理与上图的光学透镜的构造相同，用凸透镜（导向器）收集光（电波），用凹透镜（反射器）收集传过来的反射光（电波）。

为了从来到的无数电波中捕获电视电波，天线长度如何确定呢？

### 宇宙中传播速度最快的

众所周知，宇宙中传播速度最快的就是光。电（电波与电线中的电流）的传播速度也与光一样快。也就是说，1 秒钟绕地球 7 圈半的速度称为**光速** $c$。若地球 1 圈按 4 万 [km] 计算，即为 $7.5 \times 4$ 万 [km] = 30 万 [km]（图 1）。

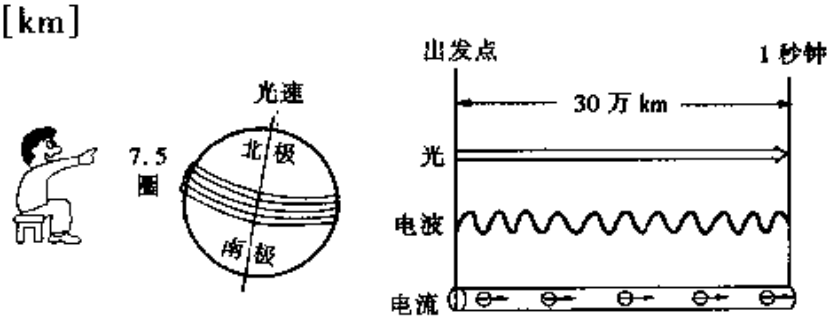



**图 1** 光速与电波的传播速度

如此大的数用指数表示更为方便。

1 万 $= 10000 = 10^4$

1k $= 1000 = 10^3$

30 万 [km] $= 30 \times 10^4 \times 10^3$ [m] $= 3 \times 10^1 \times 10^4 \times 10^3$ [m]

$= 3 \times 10^{1+4+3} = 3 \times 10^{8}$ [m]

(1 光年就是光在 1 年时间中行进的距离，试计算一下。)

## 周期与波长的计算

正弦波的周期 $T$ 与频率 $f$ 之间关系为 $T = 1/f$。试计算图 2(a)、(b)和(c)所示波形的周期。

$f = 1$[Hz] 时 $T = 1$[s]，$f = 2$[Hz] 时 $T = 0.5$[s]，$f = 50$[Hz] 时 $T = 0.02$[s]。

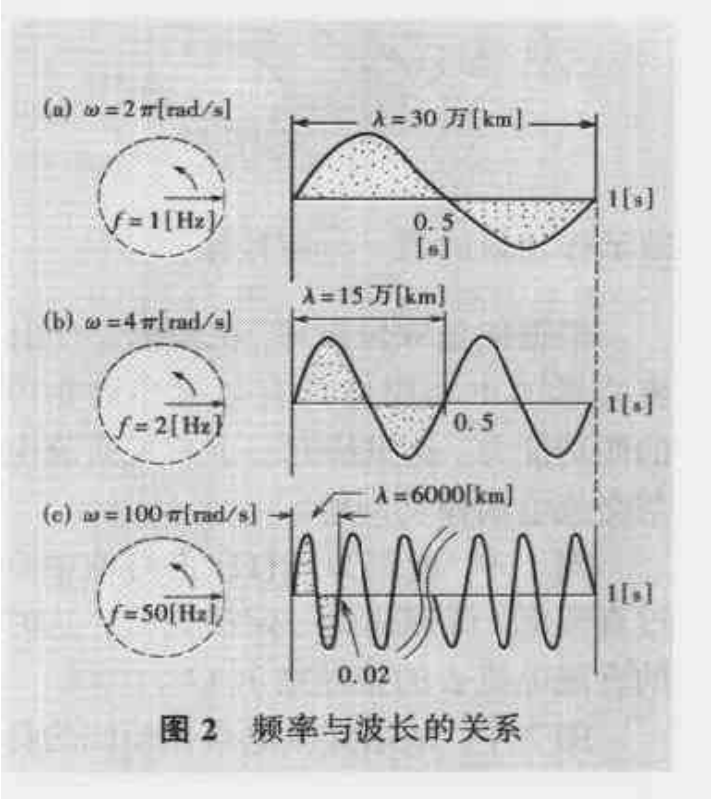


图 2　频率与波长的关系

再求出波长。在 1 个周期中传播的距离称为波长 $\lambda$，根据下式进行计算：



$$(\text{波长})\lambda = \frac{(\text{光速})c}{(\text{频率})f} \text{ [m]}$$

(a)　$f = 1$[Hz]时

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{8}}{1} = 3 \times 10^{8} \text{ [m]}$$

即与光速相等，为 30 万公里

(b)　$f = 2$[Hz]时

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{8}}{2} = 1.5 \times 10^{8} \text{ [m]}$$

(c)　$f = 50$[Hz]时

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{8}}{50} = 6 \times 10^{6} = 6\,000 \text{ [km]}$$



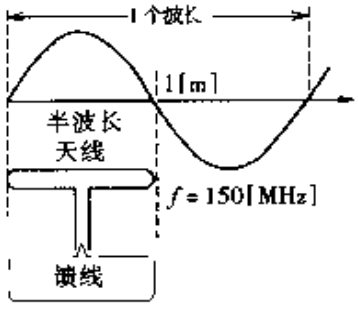
### 半波长天线的设计

为了求出电视天线的长度，需要求出与接收电波的频率 $f$ 相对应的波长 $\lambda$，若求出此波长的一半(半波长)，就可制作右图所示的天线。

$f = 150$ [MHz](兆赫，1M = $10^{6}$)

(3 频道与 4 频道之间的频率)

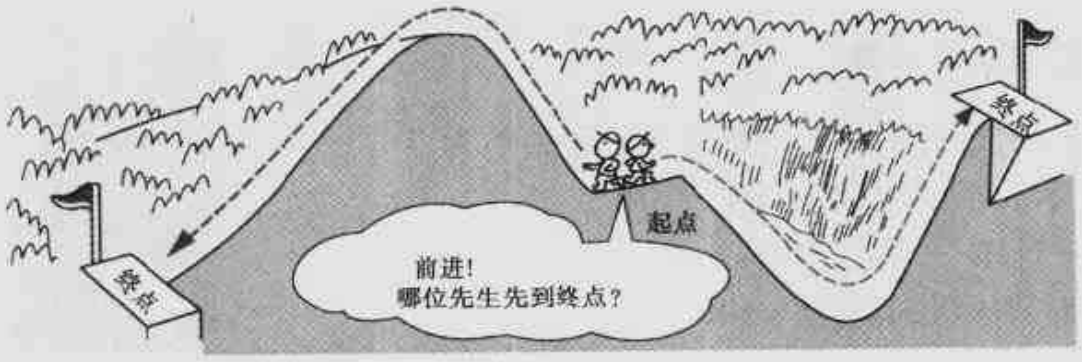
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{8}}{150 \times 10^{6}} = \frac{3 \times 10^{8}}{1.5 \times 10^{8}} = 2 \text{ [m]}$$




天线的长度为半波长，因此，天线长度为 1[m]即可。

这种形式的天线称为偶极子天线。说到天线，雷达中的八木天线是最有名的天线了。不妨研究一下。

# 4 平均值与有效值




## 表示作功量的值——有效值

根据能量守恒原理，在理论上登山的作功量与下山的作功量相等。交流波形的正半周也具有与负半周相等的作功能力。这里研究一下有关直流电与交流电的作功问题。

图 1 中，电阻为 $R(\Omega)$ 的灯泡中流过直流电，灯泡达到一定的亮度。这时的直流电流表的指针指示 1A。

图 2 中，试用交流电点亮相同的灯泡。用调压器调整电压，使灯泡的亮度与施加直流电时**相同**。这时**交流电流表**的指示为 1A。交流波形的作功量与直流相同时的值称为**有效值**。现在说明如图 2(b) 所示那样对应于瞬时值的有效值的计算方法。

首先，对瞬时值进行平方运算，使负半周也变为正，如图 2(c) 所示，最大值变为 $I_m^2$。其次，使面积 A 与面积 B 正好相等的线的高度为最大值 $I_m^2$ 的一半，即 $I_m^2/2$ 的位置。交流的有效值等于此值的平方根值，即

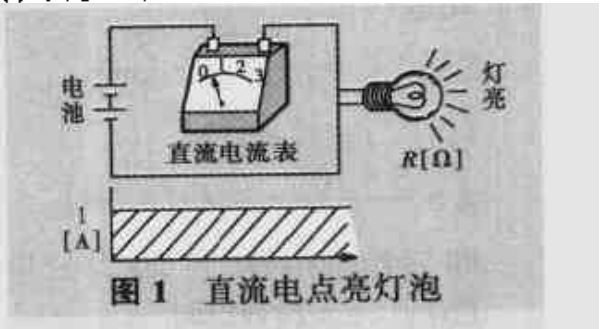



图 1　直流电点亮灯泡

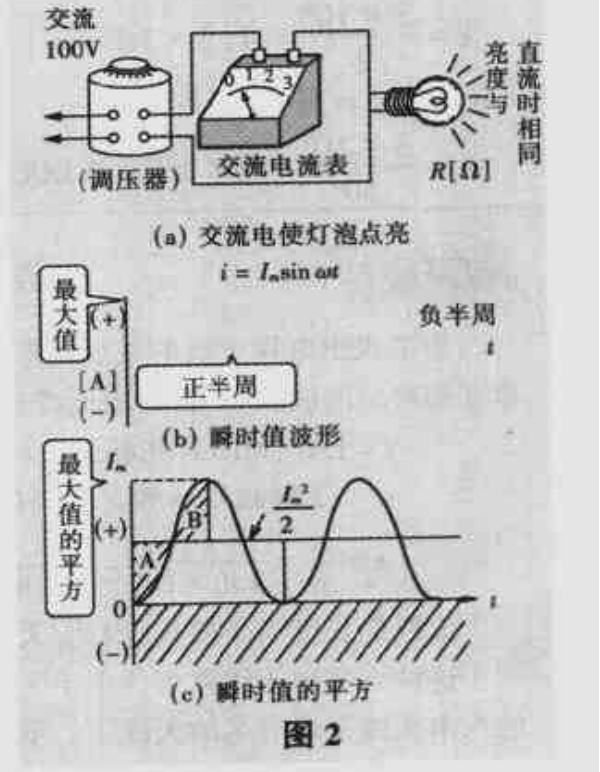



图 2

**电流有效值** $I=\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot$（**最大值** $I_m$）$=0.707\,I_m$ [A]

即有效值为最大值的 $1/\sqrt{2}$ 。

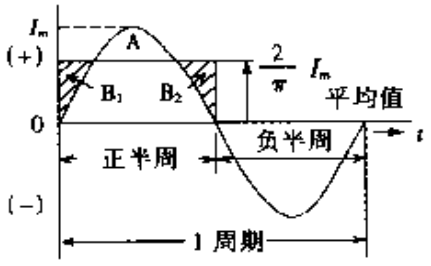



**图 3**　交流电平均值的计算方法

## 交流电波形的平均值

为了求出图 3 所示正弦交流波形的平均值，应由正半周的面积求出（若求 1 个周期的面积，则因正负半周的面积相抵消，平均值为 0）。使图 3 的面积 A 和面积 $B_1+B_2$ 相等的线的高度表示正弦波的平均值* 。



**平均值** $I_a=\frac{2}{\pi}$（**最大值** $I_m$）$=0.637\,I_m$ [A]




电压的最大值 $V_m=141.4$[V]时，试求电压的有效值与平均值。

有效值　$V=\frac{1}{\sqrt{2}}V_m=0.707\times141.4=99.97\approx100$ [V]

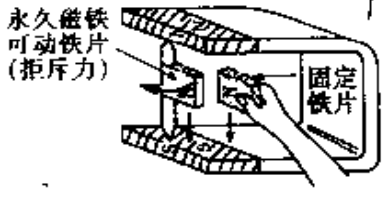
平均值　$V_a=\frac{2}{\pi}V_m=0.637\times141.4=90.07\approx90.1$ [V]



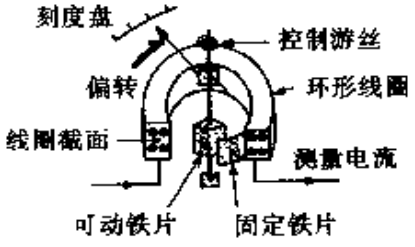

### 测量交流电的有效值



如图 (a) 所示，在尖头的铜线上安装铁片，使之相对于 U 形磁铁能自由转动。若手拿铁片慢慢地送入磁铁的内侧，则可动铁片就会向外移动。这当然是两块铁片由于磁感应被磁化为同极性，产生拒斥力。应用这个原理制作的交流电有效值的测量仪表就是图 (b) 所示的动**铁式测量仪表**。这里用线圈构成的电磁铁代替了原理图中的永久磁铁，可动铁片的轴上安装有指针与控制游丝。




(a) 原理图




(b) 动铁式测量仪表

* 严格地说，交流电的平均值为 0，一般说到交流电的平均值，是指经过半波整流或全波整流后波形的平均值，这里指的是经过全波整流后波形的平均值。——译者注

# 5 正弦波的矢量表示法




## 用方向和大小表示的量

为了表示天气预报图中的风量，用风向(方向)和风力(大小)两个量来表示。这样具有大小和方向的量称为**矢量**。为了表示矢量，如图 1 所示用箭头的长度和角度来表示。若用符号来表示，像$\dot{V}$那样在 $V$ 的上面加上一点(读作 $V$ 点)，表明这个量是矢量。

## 旋转的矢量

对于其大小每时每刻都在改变的正弦交流波形，如何用矢量来表示呢?

如图 2 所示，以箭头作为旋转量。若有来自侧面的光，就会有箭头的影子。若箭头转动 45°、90°，其影子的轨迹就是正弦波。

反之，正弦波形跟以这个波的最大值的箭头作圆周运动是相同的。一提到矢量就用方向和大小来表示，若注意到箭头转动那个时刻，则正弦波形理应用矢量来表示。

众所周知，正弦波可以用矢量来表示，但不能用旋转矢量表示。为何把它视为静止的呢?

若 1 秒钟箭头转动 1 圈，每 1 秒钟睁开眼睛看一次，2 秒后再睁开眼睛看一次，看到的总是在相同位置，所以矢量是静止的。

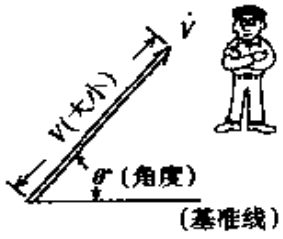



**图 1　矢量的表示方法**

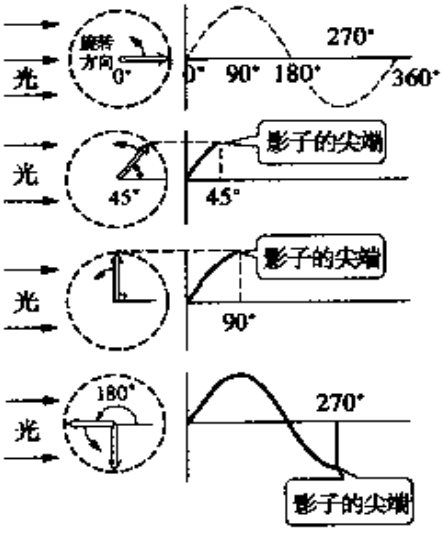



**图 2　箭头在旋转中**

## 如何表示两个矢量

A 先生和 B 先生荡秋千。两个秋千的周期相同(频率也相同),但 B 先生的相位滞后于 A 先生 90°,振幅也比 A 大。太阳正当头顶时,秋千的影子将是怎样的呢。若纵轴表示影子的长度,横轴表示周期(时间),则影子的轨迹就如图 3 所示(1 周期的刻度为 360°)。

图 4 是用矢量表示两个正弦波形的矢量图(对于频率不同的正弦波不能画出这样的矢量图)。

横轴的刻度为角度,假设这个秋千的 1 个周期为 2 秒,横轴也可以用时间来刻度。也就是说,刻度理所当然是这样的:90°时为 0.5 秒,180°时为 1 秒,360°时为 2 秒。

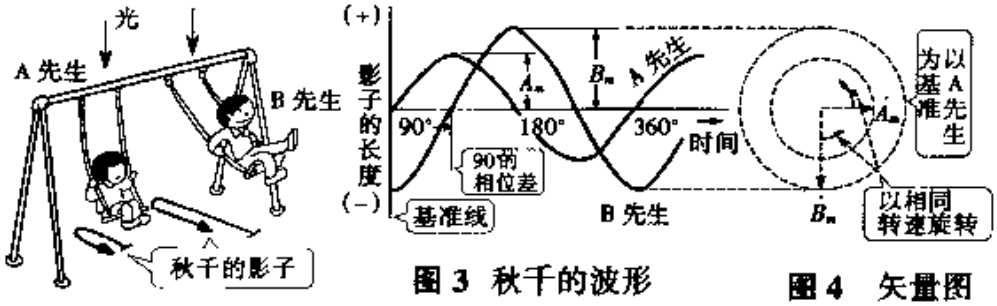
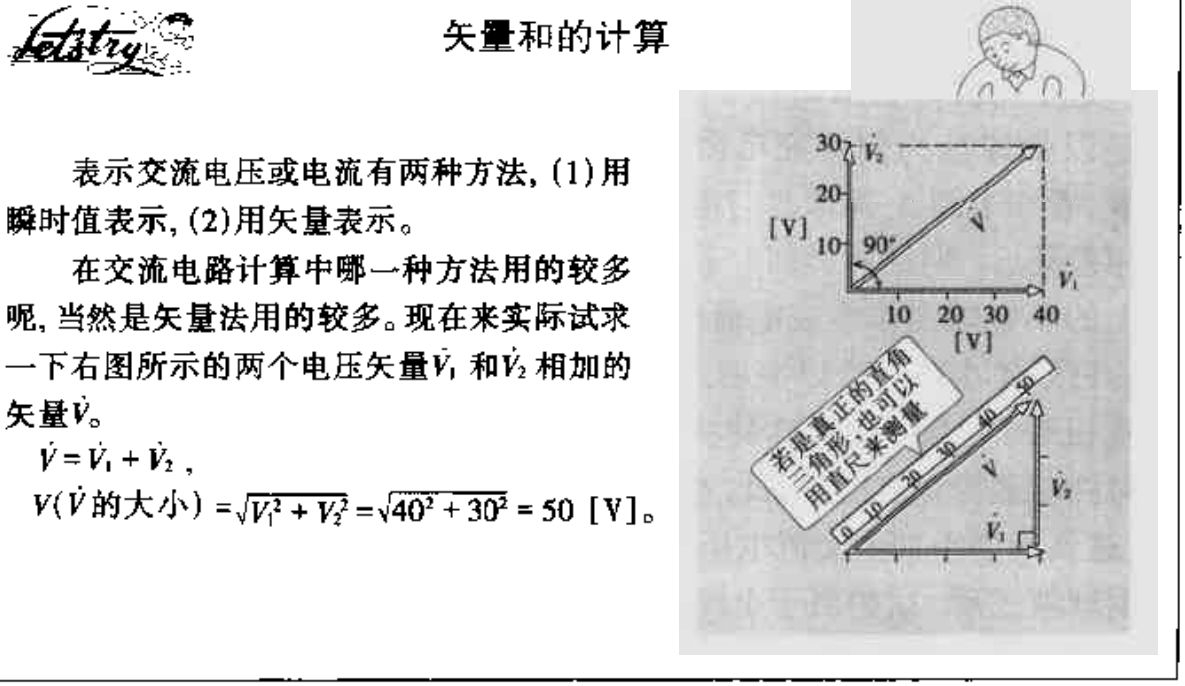
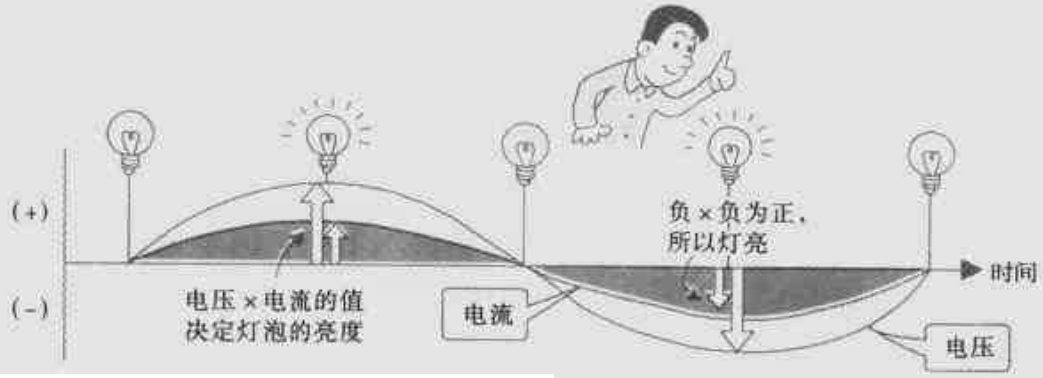



图 3 秋千的波形　　图 4 矢量图



# 6 纯电阻电路




## 交流电是脉动的吗?

尽管产生交流电的装置有多种，这里都用相同符号来表示交流电源(图 1)。

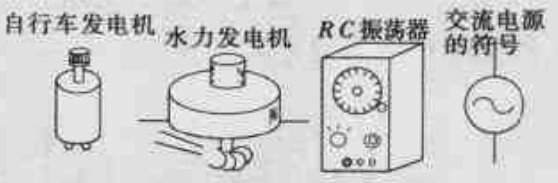



图 1　交流电的产生

交流电压产生的电流在导体中是如何流动的呢。因为是交流和脉动的，所以不好理解。请按图 2 所示理解电流的流动情况。

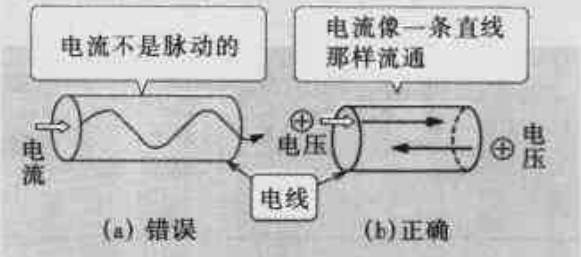



图 2　电线中的交流电流

## 弹球盘上钉子的作用

这里对弹球盘的研究不是目的，而是以弹球盘为例研究**电阻**是怎么回事。看一下图 3，弹球盘与电阻的概念相差甚远，但结构类似。若把弹球盘上的小钢球当作形成电流的电荷，因为钉子使小钢球难以滚动，所以钉子就相当于电阻。在图 3 的状态下没有对弹球盘提供斜度，因此，小钢球不能滚动。若把弹球盘的一端抬高或降低，这就相当于加上交流电压。图 4(a)是在弹球盘上加上⊕的交流电压。小钢球就滚动，这相当于电流流动，电流从⊕端流向⊖端。图 4(b)施加⊖电压，电流就流向⊖端。由此可知，在电阻上施加交流电压，电压的方向与

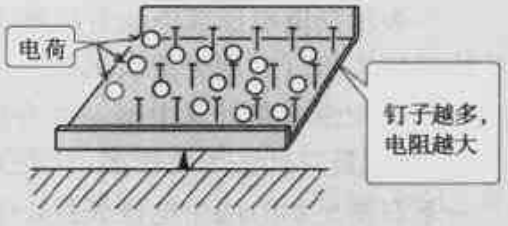



图 3　电阻模型

电流的方向总是相同的，这就是说电压和电流**同相位**（所谓同相位是指两个矢量的**相位差**为零）。

对于交流电来说相位移不是常有的事吗？但读者学习时对相位移的理解会感到有些困难。努力吧。

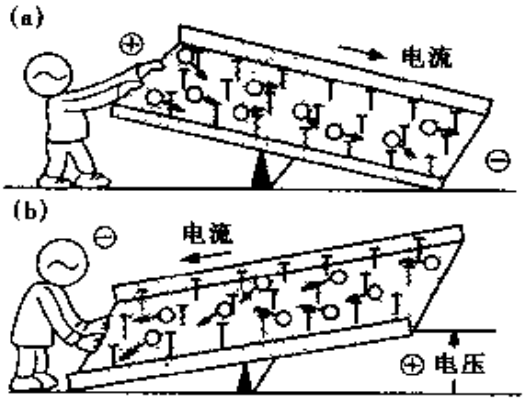



**图 4　电阻上施加交流电压的情况**

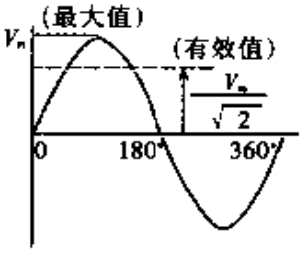


One point

## 有效值的矢量

根据瞬时值画出矢量图，迄今为止学习的都是用最大值矢量。然而，实用的值是有效值，因此，今后将一直用有效值矢量来表示。




Let's try

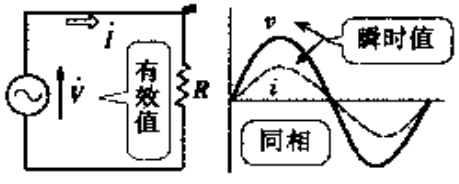
## 试对电阻电路进行小结



交流电源连接纯电阻，试求流经电路中的电流向量（大小和方向）。

❶ **求电流的大小**用欧姆定律。若用电阻 $R$ 除以电压的有效值 $V$，即可求出电流的有效值（大小）。

❷ **对于相位**，由瞬时值曲线图可知电压和电流为**同相位**。用矢量表示如右图所示。




矢量图




【问题】　在 20Ω 电阻上施加 50V 有效值电压时，电流的有效值是多大？

$$(\text{有效值})\ I=\frac{V}{R}=\frac{50}{20}=2.5\ [\text{A}]$$



# 7 纯电感电路




## 电感上施加直流电

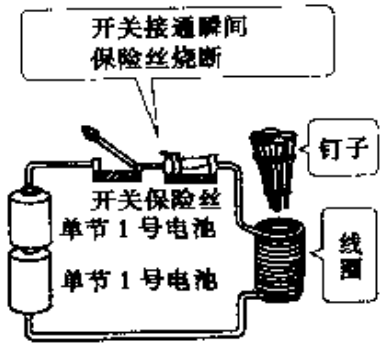



**图 1　线圈不能限制直流电流**

〈准备好器材并进行实验〉

○长 3m，直径约为 0.8mm 的漆包线

○万能(magic)笔(粗 1.5 ~ 2cm)

○ 8 ~ 10cm 长的钉子 5 个(钉子用透明胶纸带缠上，使之固定，形成铁芯)

○1 号干电池 2 节

○适当的开关 1 个

○ 1A 保险丝 2 只和保险管座 1 个

❶　在万能笔上适当地缠上漆包线(电线)，再紧缠上透明胶纸带，抽出万能笔，制成电感线圈。

❷　按图 1 接好线，在铁芯(钉子)不插入电感线圈时接通开关。发现保险丝瞬间被烧毁(开关不断开时更换新电池)。

❸　即使在线圈内插入铁芯(线圈的电感量 $L$ 较大)，一接通开关，保险丝仍被烧毁。

> One point　线圈感应磁力的能力称为**电感** $L$，单位为亨(H)，图形符号用 表示。

## 学习电抗



〈准备好器材并进行实验〉

○使用上述实验制作的线圈和铁芯

○低频振荡器和交流电流表

❶ 按图 2 所示接好线，在铁芯未插入线圈内的情况下，调高振荡器的电压，使电流表的指示值为最大（振荡器的频率适当即可）。

❷ 再把铁芯慢慢地插进线圈内（电感 $L$ 逐渐增大），电流逐渐减小。

❸ 把铁芯固定在适当位置，很明显，随着振荡器的频率增高，电流就逐渐减小。

❹ 实验中确认线圈里即使有电流流通也不会发热。

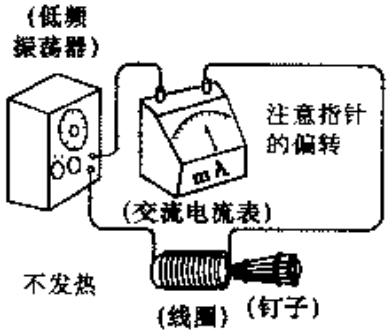



图 2　线圈限制交流电流

〈通过实验弄清的问题〉

❶ 若在电感 $L$ 上施加直流电压，电流就会无限制地增大（线圈被烧毁）。然而，施加交流电压，流过的电流就有限。

❷ 通过实验可知，在计算电流 $I$ 的表达式中，电流 $I$ 与交流电压成正比，与角频率 $\omega$ 和电感 $L$ 的乘积成反比。式中分母 $2\pi fL$ 是限制电流的交流阻抗［Ω］，叫做**感抗**。

$$I = \frac{\text{（交流电压）}}{\text{（角频率）}\times\text{（电感）}}$$

$$\| \quad I = \frac{V}{2\pi fL}$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \ [\Omega]$$

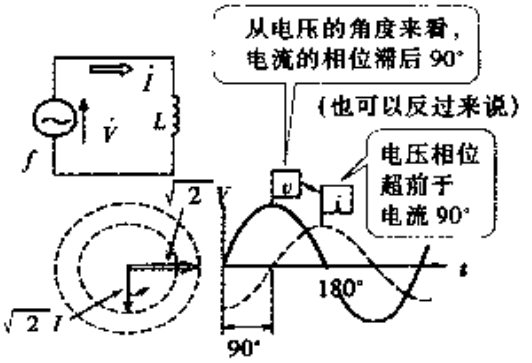
❸ 在直流情况下，$f = 0$[Hz]，因此，电抗也为零，由此可知电感不能限制直流电流。



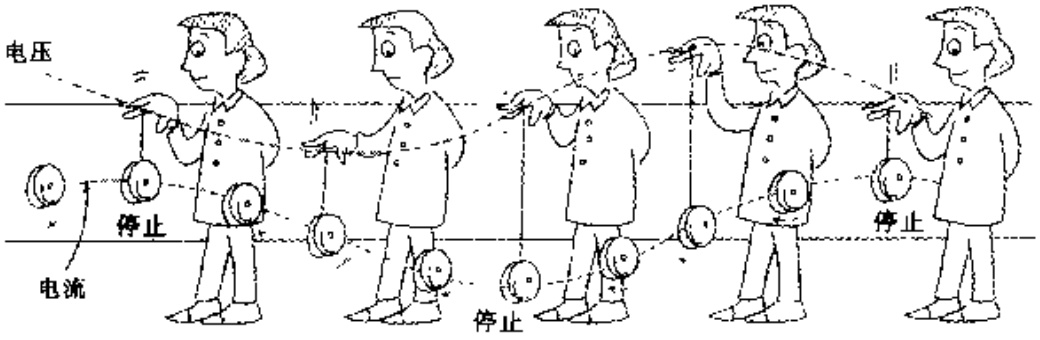
Let's try

## 有电抗的电路

由上述可知，在电感 $L$ 上施加交流电压，就会呈现出限制电流的电抗。这个电抗与电阻不同，电路中流过的电流的相位滞后于电压 90°。纯电抗的电路中电压与电流之间的关系如右图所示，用瞬时值或矢量图来表示。



# 8 纯电容电路




## 电容上积蓄的电荷

〈准备好器材并进行实验〉



○1000μF 左右的电解电容器
○12V 灯泡
○开关 SW
○12V 直流电源

❶ 按图 1(a)所示接好线，若接通开关，则瞬间灯泡微亮，但马上恢复原样，灯泡变暗。

❶ 经过足够长的时间，如图 1(b) 所示，把已充电的电容两条引线碰一下，确认发出响声，并**产生火花**。

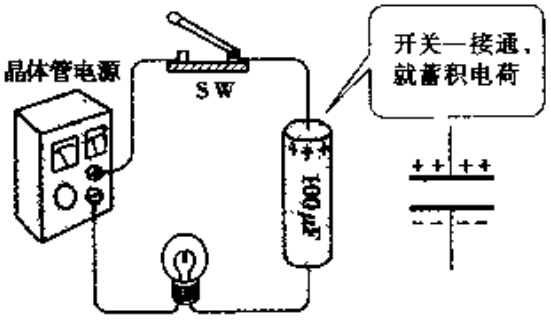



**图 1** 电容不能通过直流，仅在开始时流过充电电流

〈通过实验弄清的问题〉

❶ 仅在开关接通瞬间，有直流电流流通（灯泡变亮），但马上电流变为零，由此可知电容中不能流过直流电流（原因是电容器为用绝缘材料绕成的像三明治那样的层状结构）。




电容称为静电电容 $C$，也称为电容 $C$（表示容量）。单位采用 μF 或 pF，图形符号采用 ⊣⊢ 表示。

## 流过电容器的交流电流

〈准备好器材并进行实验〉

○两个无极性 1[μF]左右的电容器

○低频振荡器与交流电流表

❶ 按图 2(a)所示接好线，施加交流电压，确认有电流流通。

❷ 增加振荡频率，确认电流也随之增大。

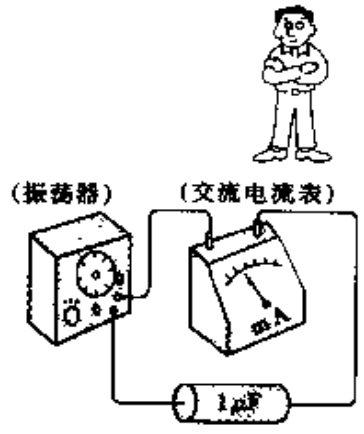
❸ 再用 2 个电容并联，如图 2(b)所示，与用 1 个电容相比，确认电流增加为 2 倍。

〈通过实验弄清的问题〉

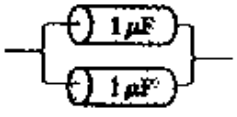
❷ 若在电容上施加交流电压，就会有电流流通。

❷ 计算电流 $I$ 的表达式如右式所示，它与交流电压 $V$ 的大小成正比，频率 $f$ 越高及电容量 $C$ 越大，电流成正比地增大。

● 右式中 $1/\omega C$ 为限制电流的电容的交流阻抗，叫做**容抗**。




(a) 频率增大，电流就随之增大




(b) 总电容量为 2μF

**图 2** 电容在交流电路中起到限制电流的阻抗作用

$$X_C = \boxed{\frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{2\pi fC}\ [\Omega]$$

$I$ = (角频率) × (静电容量) × (电压)

$I = \omega CV$

$I = \dfrac{V}{\dfrac{1}{\omega C}}$

也可用分数式表示，以 $\omega C$ 的倒数作分母。

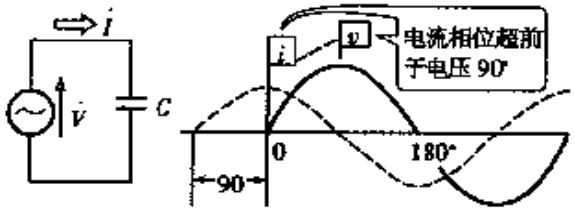
$2\pi f$



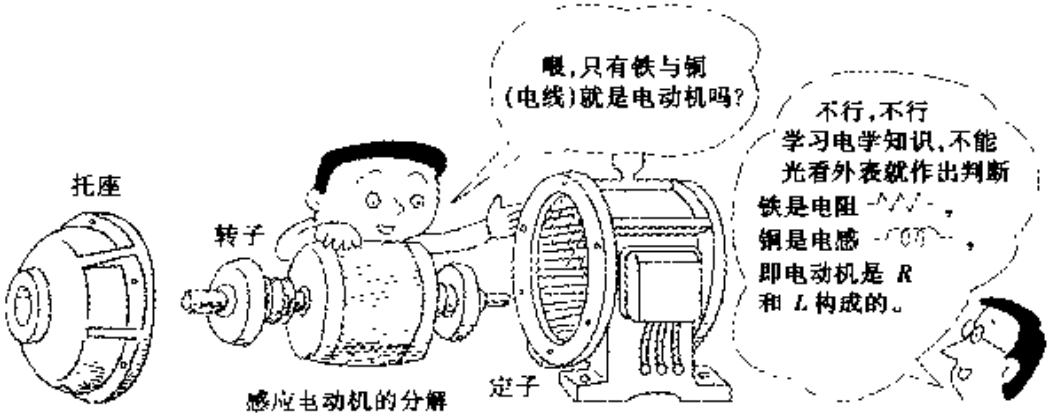
### 电容中为什么会有电流流通呢？



电容具有积蓄电荷的能力，看看施加交变电压时电荷如何移动。施加 $+V$ 电压时电容中流过充电电流，施加 $-V$ 电压时电容中流过放电电流(电压与电流的相位差为 90°)。也就是说，绝缘物中不能流通电流，由于电荷的充放电电流的作用才有电流流通。电荷量可由(电流) × (时间)求出。



# 9 *RL* 串联电路




## 试研究一下 *RL* 串联电路

如图 1 所示那样，由电阻为 $R$ 的灯泡（20～60W），电感为 $L$ 的变压器构成 *RL* 串联电路。若施加 100V 的交流电压，电灯不太亮。

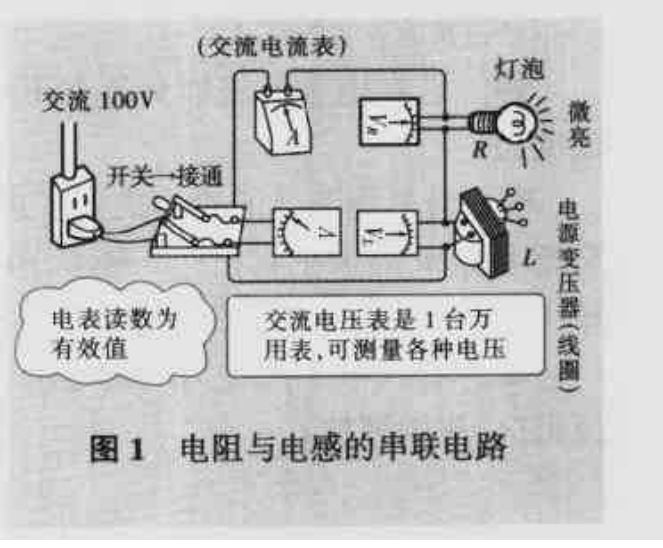


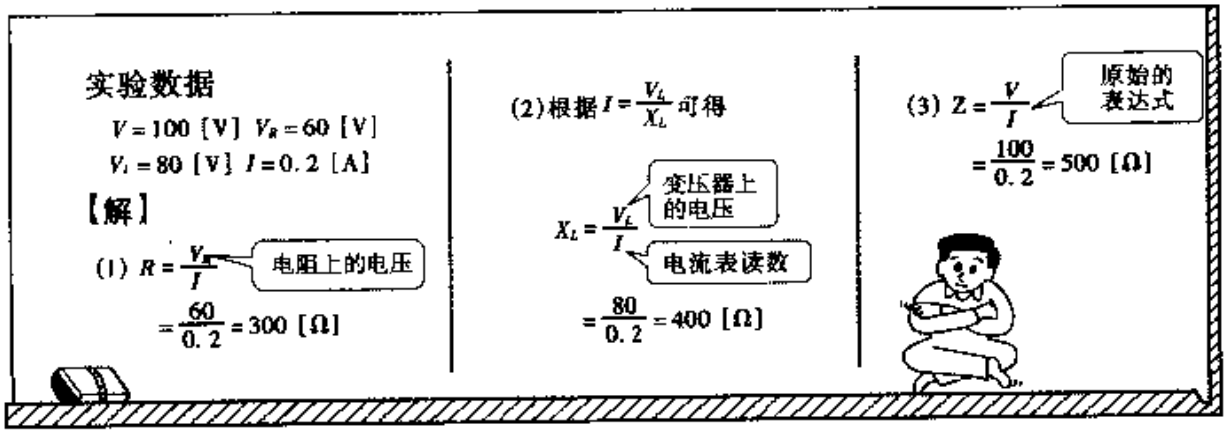

图 1　电阻与电感的串联电路

把实验结果写在黑板上。然后进行以下的计算。

❶ 计算出灯泡的电阻 $R$。

❷ 计算出线圈的感抗 $X_L$（提示：根据施加在变压器上的电压与流过的电流进行计算）。

❸ 根据电源电压与电流计算出阻抗 $Z[\Omega]$（电阻与感抗之矢量和）。



$R$ 和 $X_L$ 大小可用手拉手的形式求出

电阻串联的总阻值是各个电阻的**代数和**，即 $R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$ 这样计算即可，但即使同样是串联而感抗与电阻不是一回事（消耗电能的电阻和不消耗电能的感抗不能“装入”同一个口袋里）。限制电路电流的要素称为**阻抗** $Z$。$R$ 和 $X_L$ 为直角关系，因此根据**勾股定理**可求出阻抗 $Z$ 的大小。

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}\ [\Omega]$$

根据实验数据，使用计算的 $R$ 和 $X_L$ 值求出 $Z$。确认一下计算值与根据电压表和电流表读数求出的 $Z$ 是否相同。

根据实验数据，试研究有关电压矢量。$V_R = 60[\mathrm{V}]$，$V_L = 80[\mathrm{V}]$，它们相加为 140 [V]，而电源电压为 100[V]，因此这是不合适的。更进一步地理解，电压也可以用矢量进行计算。

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}\ [\mathrm{V}]$$

所以

$$V = \sqrt{(60)^2 + (80)^2} = \sqrt{10\ 000} = 100\ [\mathrm{V}]$$




图 2　$R$ 与 $X_L$ 是直角关系

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{300^2 + 400^2} = \sqrt{2\ 500} = 500\ [\Omega]$$




图 3　电压矢量图

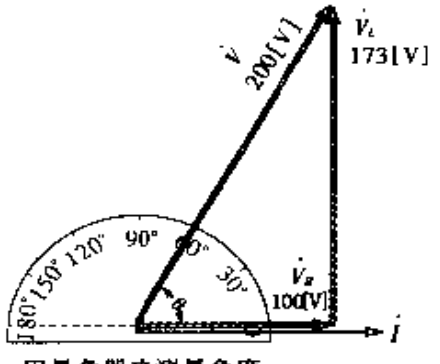
## 计算一下电压和电流的相位差

右图是 $RL$ 串联电路的电压和电流矢量图。为了求出电源电压 $\dot{V}$ 和电流 $\dot{I}$ 的相位差，要画出准确的矢量图，也有用量角器进行测量的方法。计算时若使用三角函数 tan，则有

$$\tan\theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{173}{100} = 1.73$$

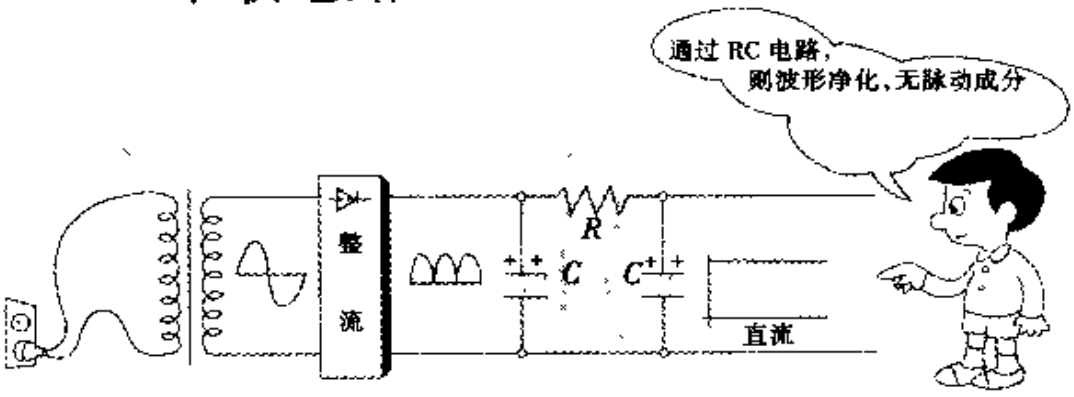
由三角函数表查得 $\theta = \tan^{-1}1.73 = 60°$






用量角器来测量角度

# 16 RC 串联电路




## RC 串联电路的实验

如图 1 所示，电阻 $R$ 用灯泡 (20～60W)，电容 $C$ 用无极性电容(5～20μF)，电阻与电容串联。若施加 100V 的交流电压，电灯稍亮。

把实验结果写在黑板上。试进行以下的计算。

❶ 根据电流表和电压表测得的值计算灯泡的电阻 $R$。

❷ 计算电容 $C$ 的交流阻抗，也就是容抗 $X_C$。

❸ 根据电源的电压与电流计算阻抗 $Z[\Omega]$。




图 1

**实验数据**

$V=100$ [V]　$V_R=80$ [V]
$V_C=60$ [V]　$I=0.4$ [A]

【答】

(1) $R=\dfrac{V_R}{I}$ ← 电阻的电压

$=\dfrac{80}{0.4}=200$ [Ω]

(2) $X_C=\dfrac{V_C}{I}$ ← 电容两端的电压

$=\dfrac{60}{0.4}=150$ [Ω]

(2) $Z=\dfrac{V}{I}$ ← 阻抗为 $R$ 与 $X_C$ 的矢量和

$=\dfrac{100}{0.4}=250$ [Ω]

One point

电容的电抗称为容抗 $X_C$，电感线圈的电抗称为感抗 $X_L$。

容抗(capacitive reactance)

感抗(inductive reactance)

## $R$ 和 $X_C$ 大小可用手拉手的形式求出

电阻和容抗作为手臂，将二者接起来的长度为阻抗。如图 2 所示，$X_C$ 滞后于 $R$ 的相位差为 90°，因此，根据勾股定理，阻抗 $Z$ 的大小为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}\ [\Omega]$$

若根据图 1 的 $R$ 和 $X_C$ 计算阻抗的话，则计算结果，跟由电压表和电流表读数求出的阻抗值是一致的。计算方法如下：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{200^2 + 150^2}$$
$$= \sqrt{62\ 500} = 250\ [\Omega]$$



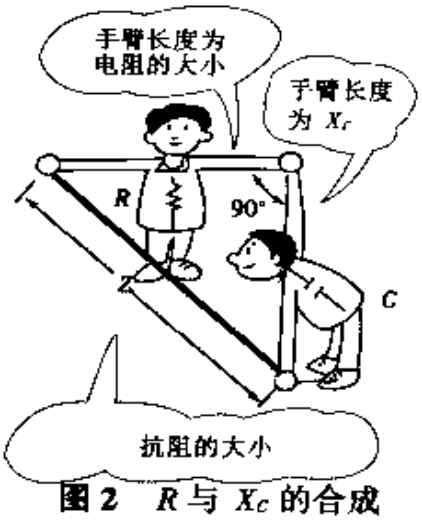



图 2　$R$ 与 $X_C$ 的合成

根据图 1 的实验数据，试研究一下电压矢量。

$V_R = 80[\mathrm{V}]$，　$V_C = 60[\mathrm{V}]$，它们相加为 140V，比电源电压 100V 要高。这样计算，80 和 60 相加怎么会得 100 呢？若用矢量进行计算，电压就正好是 100V。

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}\ [\mathrm{V}]$$

画出图 3 所示的电压矢量图。

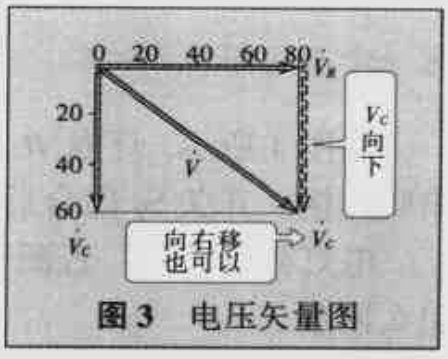
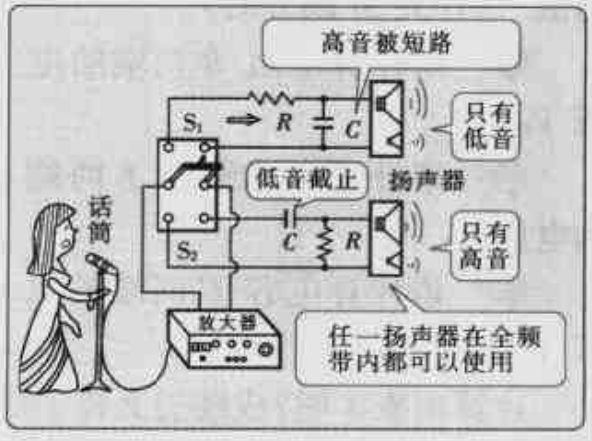



图 3　电压矢量图

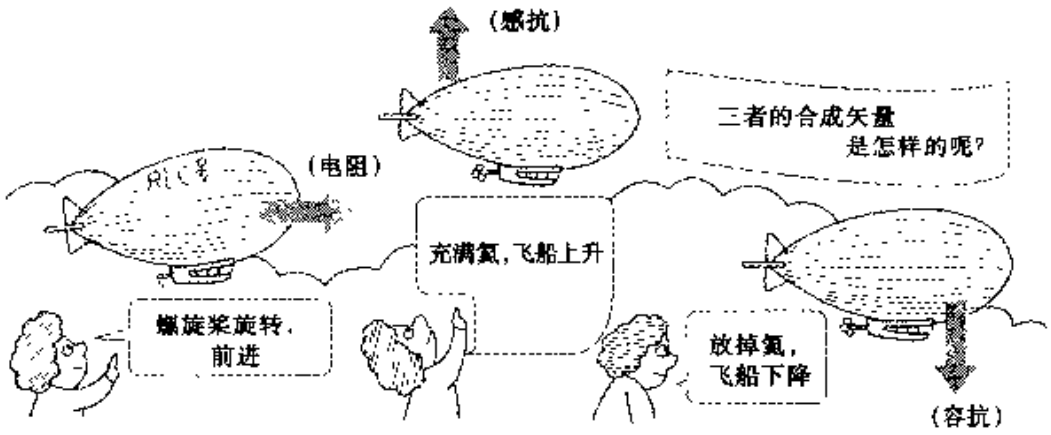


### $R$ 和 $C$ 进行调换就会得出相反结果

右图中的女士为成为歌手正在练习唱歌。暂且做个实验。如图所示，若上方扬声器响起来，低音特别强，而下方扬声器则相反，高音特别强，原因何在。原因是上方电路中 $C$ 的电抗为 $X_C = 1/2\pi fC$，若 $f$ 增高，则 $X_C$ 减小（相当于短路），高音就不会进入扬声器中。而在下方的电路中，电容 $C$ 串联在电路中，因此，低频时 $X_C$ 增大，所以低频信号不能进入扬声器中。



# *RLC* 串联电路




做一个不可思议的实验

如图 1 所示，灯泡 $R$，电感线圈 $L$ 及电容 $C$ 串联连接。开关 $S_2$ 闭合后接通电源开关 $S_1$。

电灯微亮。这时，若断开 $S_2$，电灯突然变亮。怎么回事。

在阐述其理由之前进行以下的计算。

数据已写在黑板上，已知电路的电阻 $R$，线圈的电抗 $X_L$，电容的电抗 $X_C$ 以及电源电压 $V$ 和电流 $I$ 的值。〈开关 $S_2$ 断开时〉

❶ 请计算电阻 $R$ 两端的电压 $V_R$。

❷ 请计算电感线圈 $L$ 两端的电压 $V_L$。

❸ 请计算电容 $C$ 两端的电压 $V_C$。

计算出来了吗?成绩怎么样。

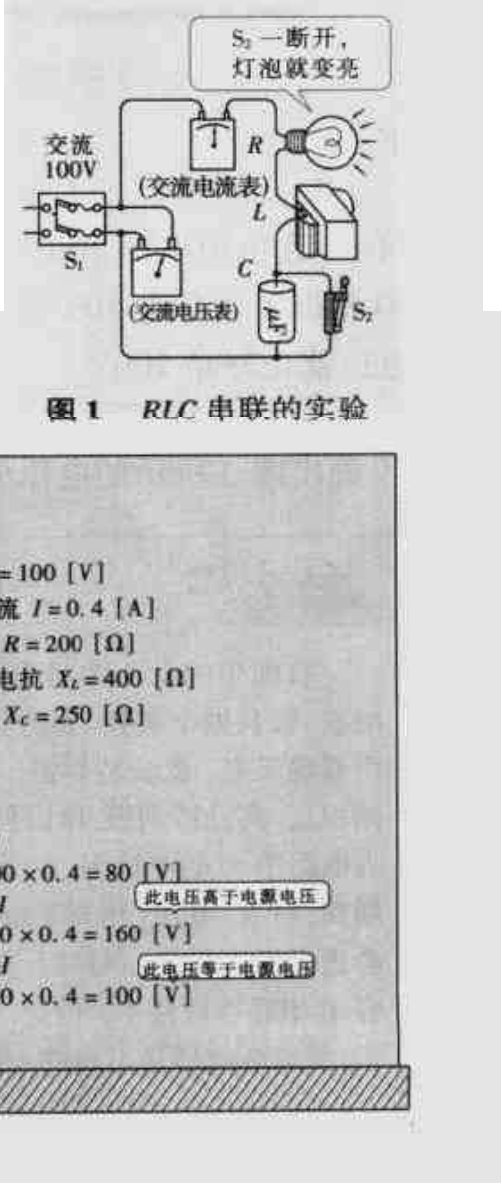



图 1　*RLC* 串联的实验

阻抗的计算方法

图 1 的 $S_2$ 闭合时的 $RL$ 串联电路的阻抗矢量图如图 2(a) 所示。这是以 $x$ 轴表示电阻，$+y$ 轴表示线圈的电抗 $X_L$ 而画出的矢量图。若计算阻抗 $Z$ 的大小，则有

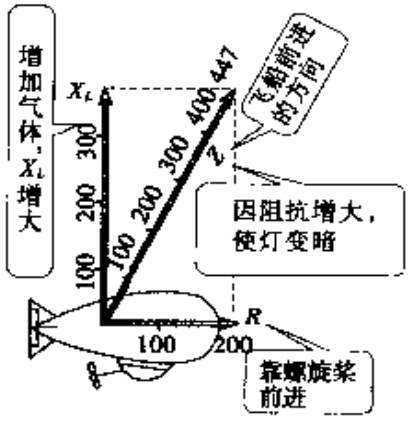
$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{200^2+400^2}=447\ [\Omega]$$

然后，针对图 1 的 $S_2$ 断开时的 $RLC$ 串联电路，画出合成阻抗的向量图。如图 2(b)所示，$x$ 轴表示电阻，$+y$ 轴表示线圈的电抗 $X_L$，$-y$ 轴（向量平移也可以）表示电容的容抗 $X_C$ 而画出的矢量图，合成的矢量就是阻抗 $Z$。其大小为：

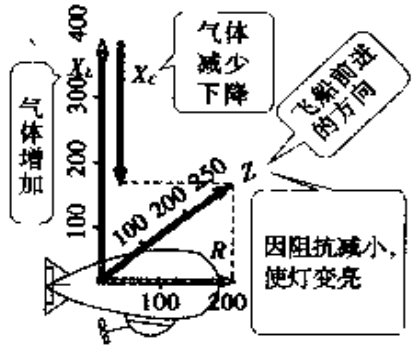
$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

$$=\sqrt{200^2+(400-250)^2}=250\ [\Omega]$$

若对图 2(a) 和图 2(b) 的阻抗进行比较的话，图 2(a) 的阻抗大，由此可知，流经电路中的电流减小，灯泡变暗。




(a) $S_2$ 闭合时




(b) $S_2$ 断开时

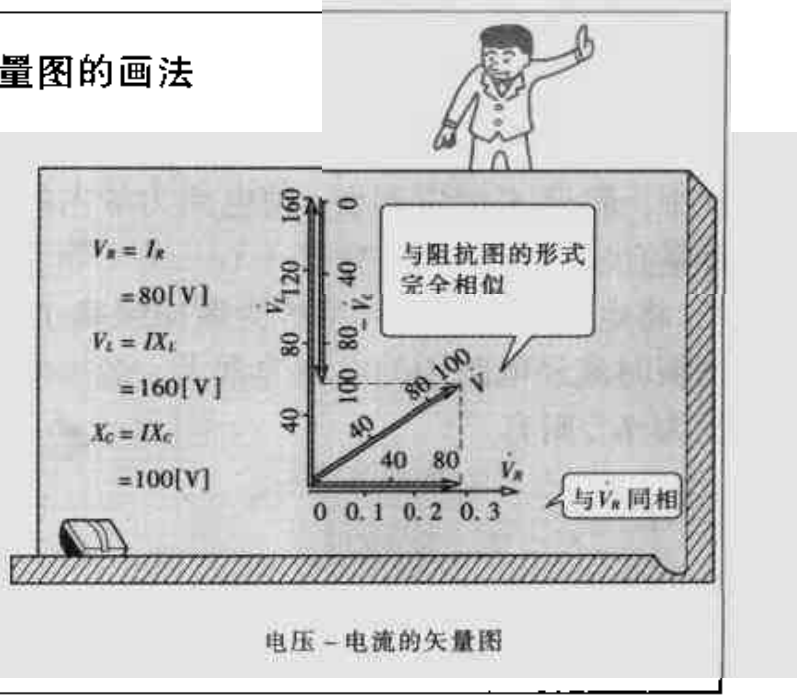
**图 2　*RLC* 的阻抗矢量图**

Let's try

## 电压矢量图的画法

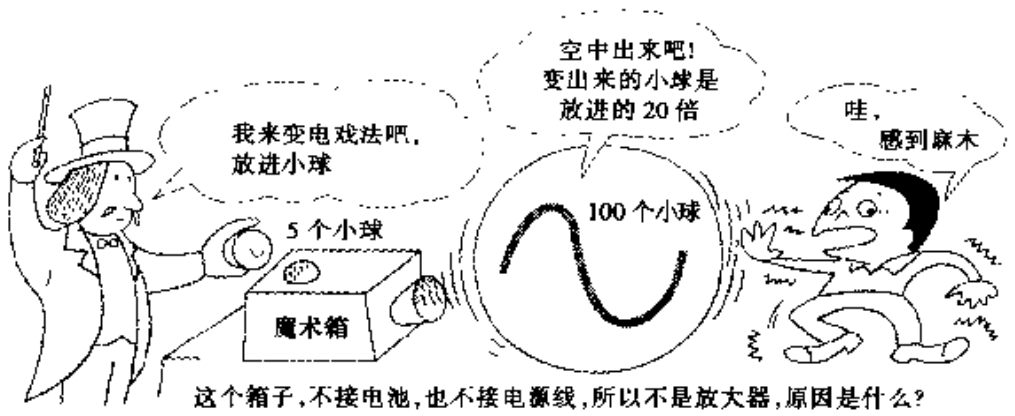
为了画出图 1 的 $RLC$ 串联电路的电压矢量图，首先是电阻、电抗、阻抗与电流相乘，计算出电压（计算的结果写在左边的黑板上）。

再以电流 $\dot{I}$ 作为基准矢量，按照图 2(b)所示画出这些电压矢量，画出的就是右图所示的电压矢量图。




电压－电流的矢量图

# 12 LC 串联谐振



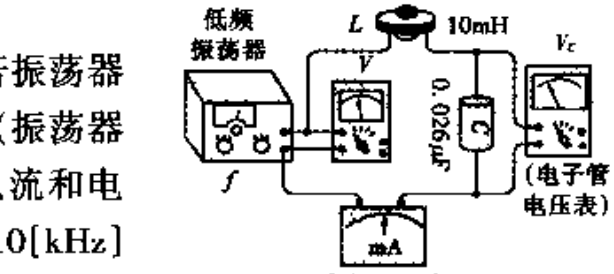

## 山(电流)越高越好

如图 1(a)所示, *LC* 串联连接, 若振荡器的频率从 5[kHz]开始慢慢增大起来(振荡器的电源电压恒定不变), 电流表的电流和电容器上的电压 $V_C$ 逐渐增大, 频率为 10[kHz]时, 电流与电压 $V_C$ 都达到最大值。频率再增大时电流与电压又逐渐减小(参见图 1(c))。若考虑线圈的有效电阻, 图 1(a)的等效电路就变成图 1(b)所示那样。流经电路中的电流可按下式求出:

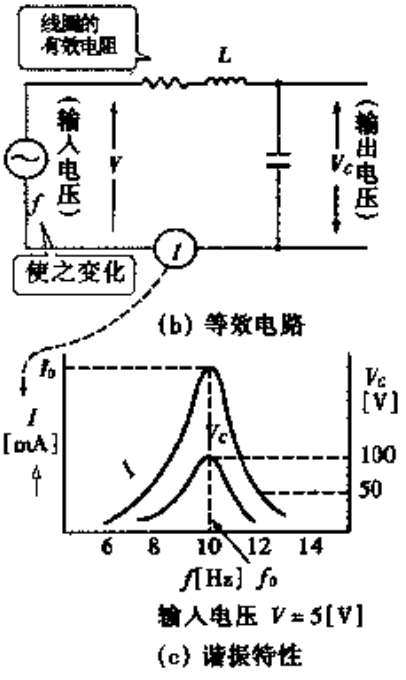
$$I=\frac{V}{\sqrt{r^2+(X_L-X_C)^2}}\quad[\mathrm{A}]$$

式中, 假设 $V$ 恒定不变, 使电流为最大的条件是什么呢? 应该是分母 $(X_L-X_C)$ 等于零吧。将电抗为 0 时的频率称为**谐振频率** $f_0$。谐振时流经电路中的电流非常大, **谐振电流**设为 $I_0$, 则有

$$I_0=\frac{V}{r}$$




(a) *LC* 谐振实验电路




(b) 等效电路

(c) 谐振特性

图 1 *LC* 串联谐振实验




式中的 $r$ 为线圈的有效电阻, 其值一般很小(参见第 7 章 4)。 $r$ 越小, 谐振电流 $I_0$ 越



大。这时谐振电流 $I_0$ 流经电抗 $X_C$，因此，电压非常高(相当于本节开头的插图中所画的出口部分的小球)。

## 电路的 $Q$ 值相当于电压放大系数

这里研究一下收音机。收音机的调谐电路就是天线线圈和可变电容器构成的 $LC$ 并联谐振电路，它是通过调节可变电容器而从无数的电波中选择所需电波的电路(图 2)。

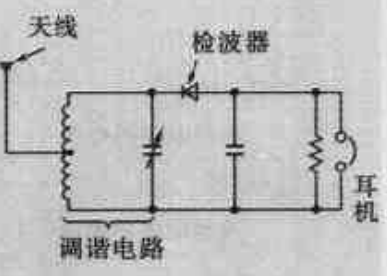


图 2　最简单的收音机的原理

这种选择的优良度 $Q$(选择性)定义如下：

$$Q=\frac{\text{输出电压}}{\text{谐振时输入电压}}=\frac{V_C}{V}=\frac{\omega_0 L}{r}=\frac{1}{\omega_0 C r}$$

在图 1 的情况下，若计算 $Q$ 值，则有

$$Q=\frac{V_C}{V}=\frac{100}{5}=20$$



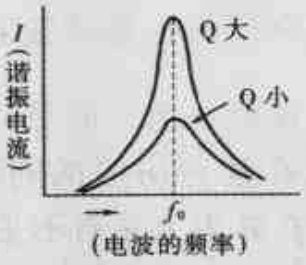


图 3　谐振曲线

也就是说，谐振电路不是放大器，但可以说把电压放大了 20 倍。图 3 示出谐振曲线(resonance curve)。



### 谐振频率的计算方法



所谓谐振条件就是 $RLC$ 回路中的 $LC$ 电抗 $X_L$、$X_C$ 之差为 0，这时频率为谐振频率 $f_0$。根据右边式(1)到式(5)的推导过程，得出计算 $f_0$ 的公式。试计算下述 $LC$ 值的谐振频率 $f_0$，已知 $L=10[\text{mH}]$，$C=0.026[\mu\text{F}]$。

【解】

$$L=10\times10^{-3}[\text{H}],\ C=0.026[\mu\text{F}]=0.026\times10^{-6}\ [\text{F}]$$
$$=2.6\times10^{-8}\ [\text{F}]$$

$$\sqrt{LC}=\sqrt{10^{-2}\times2.6\times10^{-8}}=\sqrt{2.6\times10^{-10}}=1.6\times10^{-5}$$

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{6.28\times1.6\times10^{-5}}=\frac{10^5}{10}=10^4=10\ [\text{kHz}]$$

$$\omega_0 L-\frac{1}{\omega_0 C}=0 \quad (1)$$

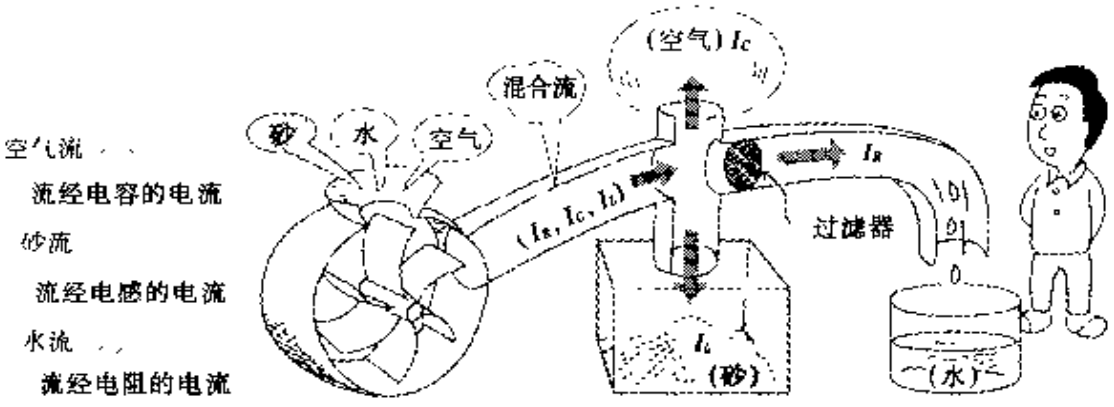
$$2\pi f_0 L=\frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (2)$$

$$2\pi L f_0^2=\frac{1}{2\pi C} \quad (3)$$

$$f_0^2=\frac{1}{(2\pi)^2 LC} \quad (4)$$

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

# 13 *RLC* 并联电路




## 家用电灯线也是并联电路

家庭供电一般是交流 100V*。电力线在建造房屋的同时就进行了配置，在外表上是看不见的，若接通开关，则任何电器都加上了 100V 的交流电压，这样考虑电器是**并联连接**。

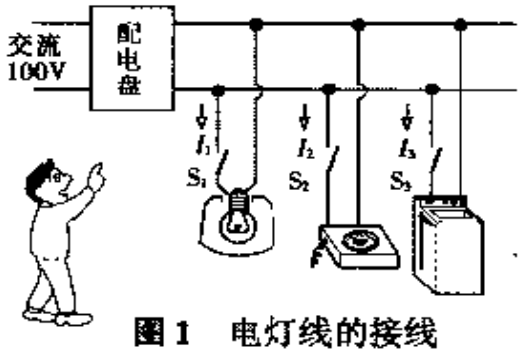



**图 1　电灯线的接线**

图 1 中，电灯和电热器的电流 $I_1$ 和 $I_2$ 的总电流与流经配电盘的电流大小相同，若加上洗衣机的电流 $I_3$，则流经配电盘的电流并不等于 $I_1 + I_2 + I_3$。原因何在呢？

也就是说，电灯和电热器是电阻负载，因此，流过的电流和电压同相位。然而，洗衣机的电动机是电感和电阻负载，流过的电流的相位滞后于电压。这样不同相位的电流的合成当然要用矢量进行计算。

## *RLC* 并联电路

图 2 所示的电路接入 100V 交流电压。将开关 $S_1$、$S_2$ 和 $S_3$ 的状态适当地组合，则电流表指示的 $I_0$ 会是不可思议的数值(用矢量计算)。

试看一下开关的几种不同组合的实验。

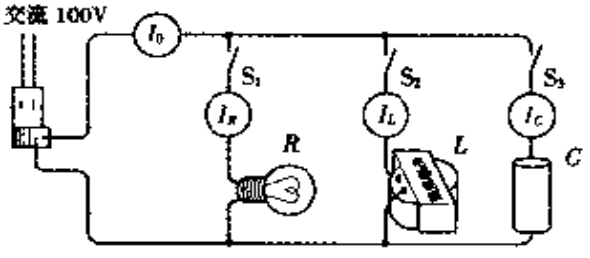
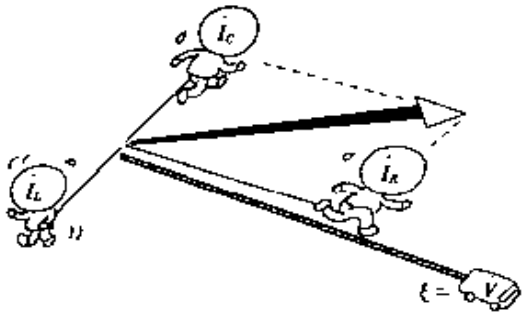



**图 2　*RLC* 并联电路电流的测量**

* 这是针对日本国的电力制度而言，中国的民用供电一般为交流 220V。——校者注

【实验】




(a)　只是 $S_1$ 闭合。

(b)　$S_1$ 和 $S_2$ 同时闭合。

(c)　$S_1$，$S_2$，$S_3$ 都闭合。

根据实验结果，试求出下述数值。

(a)　灯泡的电阻是多少欧?

(b)　线圈的电抗 $X_L$ 是多少欧?

(c)　实验(c)的总电流 $I_0$ 为什么是 1.25A。

实验数据

(a) $I_R=1$[A]..... $I_0=1$ [A]

(b) $I_R=1$[A], $I_L=0.5$[A]..... $I_0=1.1$ [A]

(c) $I_R=1$[A], $I_L=0.5$[A], $I_C=1.25$[A].... $I_0=1.25$ [A]



【解】

(a) $R=\dfrac{V}{I_R}=\dfrac{100}{1}=100$ [Ω]

(b) $X_L=\dfrac{V}{I_L}=\dfrac{100}{0.5}=200$ [Ω]

(c) $I_R$，$I_L$，$I_C$ 的代数和为

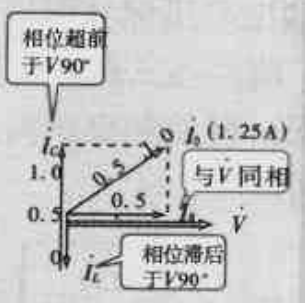
$I_0=I_R+I_L+I_C=2.75$ [A]

因为这些量是矢量，所以总电流大小为

$I_0=\sqrt{I_R^2+(I_C-I_L)^2}$

$=\sqrt{1^2+0.75^2}=1.25$ [A]






Let's try

## 求出流进的电流之和



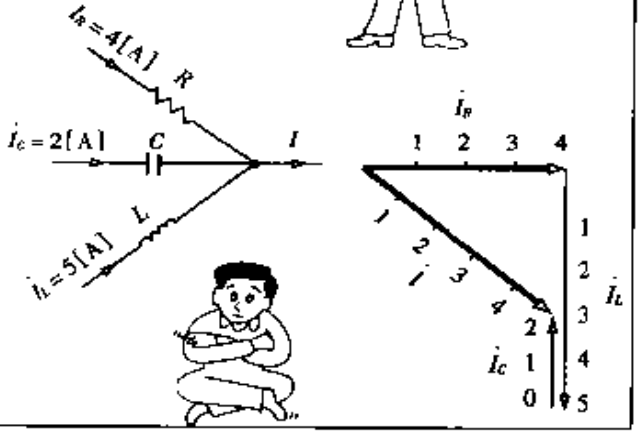
为了求得右图所示电路的总电流，要画出 $I_R$，$I_C$，$I_L$ 的矢量图，若用直尺测量出长度，可求出电流的大小 $I=5$ [A]。

另外，若通过计算求得总电流，则有

$$I=\sqrt{I_R^2+(I_L+I_C)^2}$$

$$=\sqrt{4^2+(5-2)^2}=5\ [\mathrm{A}]$$

(用哪种方法均可)



# 14 LC 并联谐振




## 并联谐振为 V 形曲线

如图 1 所示，$L$ 和 $C$ 并联连接。振荡器的输出电压保持恒定，若频率从低到高变化，流经各支路的电流如何变化呢。显而易见，随着频率增高，流经线圈的电流 $I_L$ 减小。

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{V}{2\pi fL}$$

若分母中 $f$ 增大，则电流 $I_L$ 就减小

而电容中的电流 $I_C$ 反而增大。

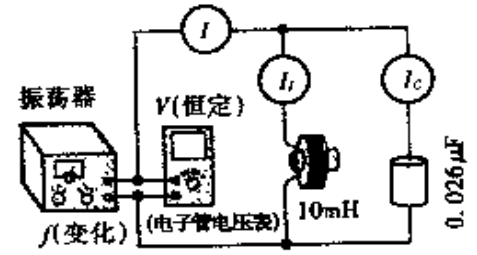
$$I_C = \frac{V}{X_C} = 2\pi fCV$$

若 $f$ 增大，则 $I_C$ 按比例增大。

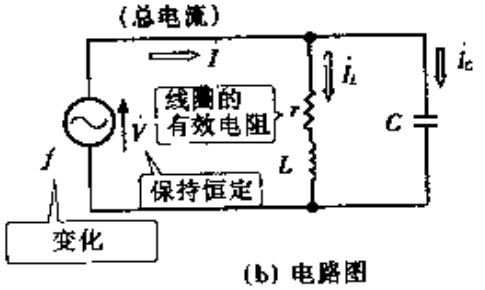
那么，$I_L$ 和 $I_C$ 的合成电流 $I$ 如何变化呢？如图 1(c) 的曲线所示，通过某个电流近似为零的频率之后，合成电流又增大，形成一条 V 形曲线。

电流最小时的 $f$ 称为**谐振频率** $f_0$。

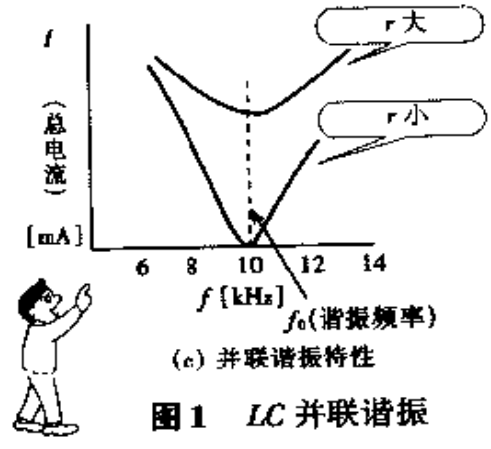
另外，并联谐振称为反谐振，$LC$ 串联电路的振荡状态称为串联谐振，有时简称为谐振。




(a) 改变振荡频率




(b) 电路图




(c) 并联谐振特性

**图 1　LC 并联谐振**



## 魔术揭秘

图 2 表示 $LC$ 并联谐振时，流经各支路的电流的瞬时值。流经电容器的电流 $i_C$ 的相位超前于电压 90°（大小参见前页的 $I_C$ ）。流经线圈的电流，其相位滞后于电压 90°（线圈的有效电阻为 $r$，因此 $r$ 越大，与电压的相位差变小，小到 80°或 70°）。

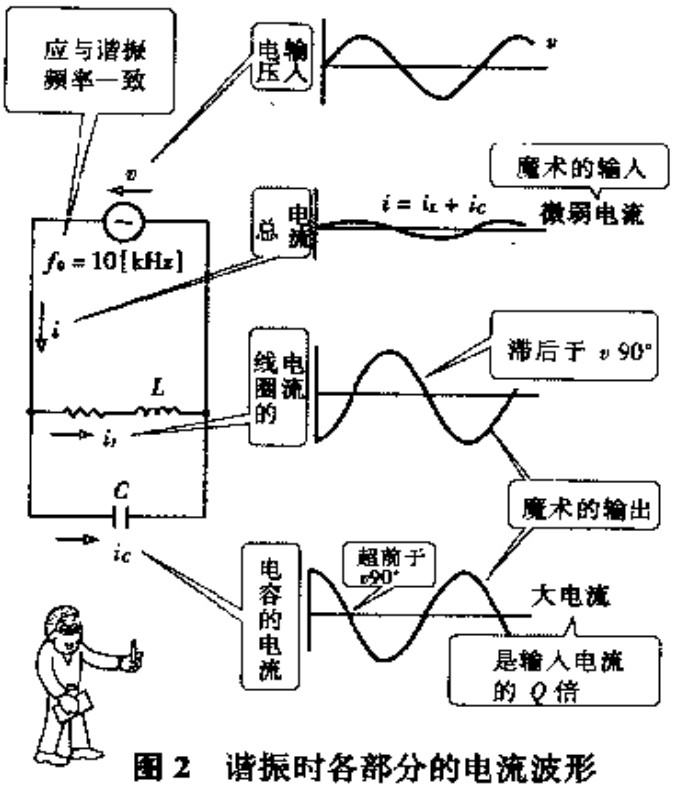



图 2　谐振时各部分的电流波形

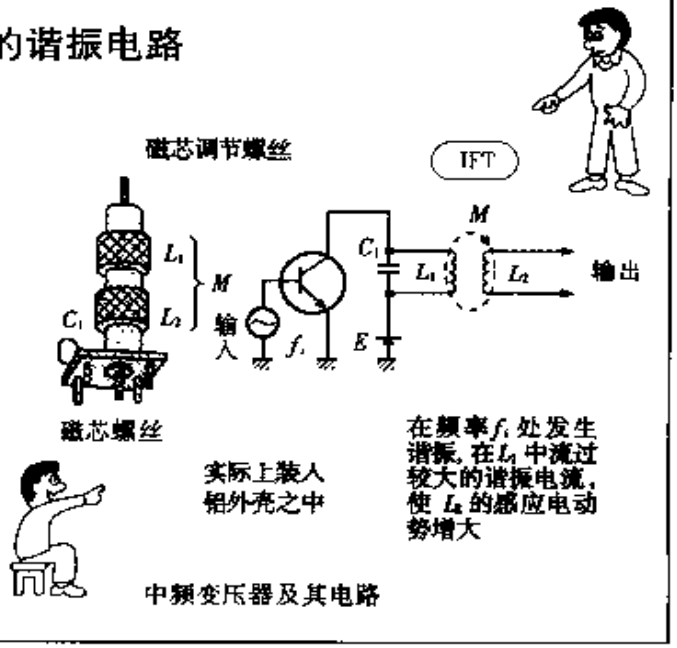
合成电流 $i$ 是 $i_C$ 和 $i_L$ 相加之和，若把幅度相同的正弦波进行合成，其差变为零（实际上不为零，仍有微弱电流在流动）。

小魔术中的输入就是合成电流，输出当然是指流过线圈的电流，或流过电容器的电流。

由并联谐振可知，谐振时阻抗非常高。

### 实际应用的谐振电路

收音机或电视机电路中多采用 $LC$ 谐振电路。右图所示即所谓的中频变压器。其电路是，把输入中的中频频率信号（收音机 $f_i$ =455kHz）进行放大，$L_1$ 和 $C_1$ 在 $f_i$ 频率时产生并联谐振。谐振电流流过 $L_1$，通过互感作用在 $L_2$ 中产生感应电动势。





# 本章小结



**1.** 根据图 1 所示的波形，试表示电压的瞬时值 $v$ 和电流的瞬时值 $i$。

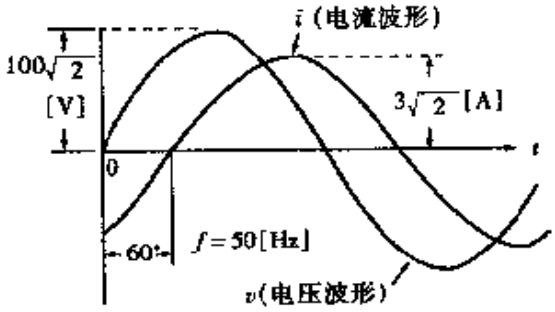



图 1

【解】 $v=$（最大值）$\times\sin(\omega t+\theta°)$

$=(\quad)\sin(2\pi(\quad)t+0°)[\mathrm{V}]$

$i=(\quad)\sin\{100\pi t-(\quad)\}[\mathrm{A}]$

**2.** 试计算题 1 的电压和电流的有效值(参见4)。

【解】 电压的有效值 $V=(\quad\quad)[\mathrm{V}]$，电流的有效值 $I=(\quad\quad)[\mathrm{A}]$

**3.** 如图 2 所示，若 $RLC$ 电路连接 100V 交流电压，灯泡点亮，但与 $L$ 并联的开关一接通，电灯就变暗，这是为什么？

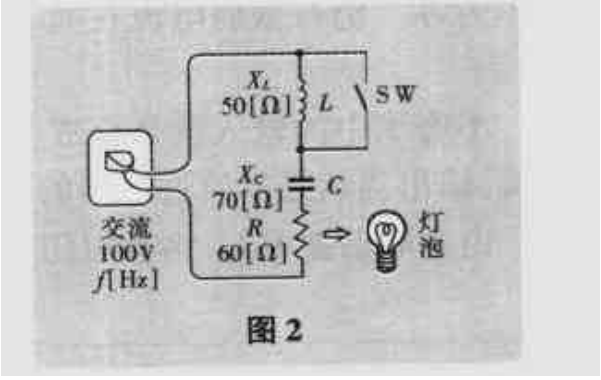



图 2

【解】 灯泡亮说明电流大，暗说明电流小，因此，应求电路的阻抗大小。

开关断开时，$Z_1=\sqrt{(\quad)^2+(X_C-X_L)^2}=\sqrt{(\quad)^2+20^2}=63.2\ [\Omega]$

开关接通时，$Z_2=\sqrt{R^2+(\quad)^2}=\sqrt{60^2+(\quad)^2}=92.2\ [\Omega]$

即 $Z_2>Z_1$，阻抗大则流过的电流减小，灯泡当然变暗。

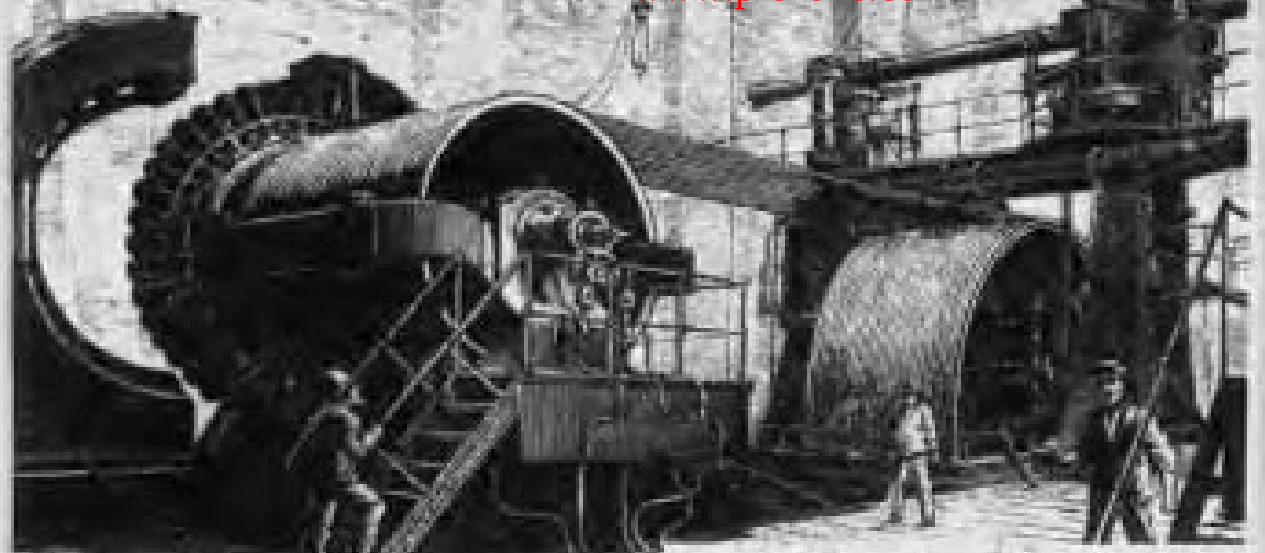
【答案】

1. $v=100\sqrt{2}\sin(2\pi 50t+0°)$，$i=3\sqrt{2}\sin(100\pi t-60°)$
2. $V=100\ [\mathrm{V}]$，$I=3\ [\mathrm{A}]$
3. $Z_1=\sqrt{(R)^2+(X_C-X_L)^2}=\sqrt{60^2+20^2}$

   $Z_2=\sqrt{R^2+(X_C)^2}=\sqrt{60^2+70^2}$



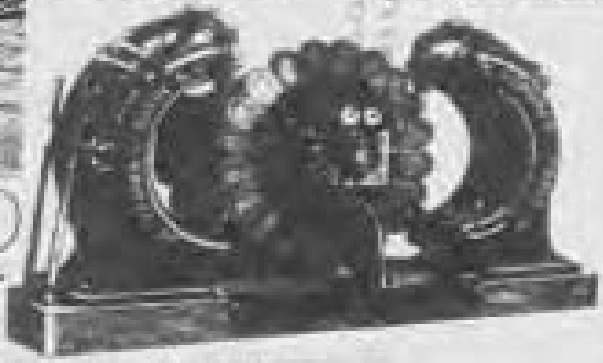
# 6 交流电路



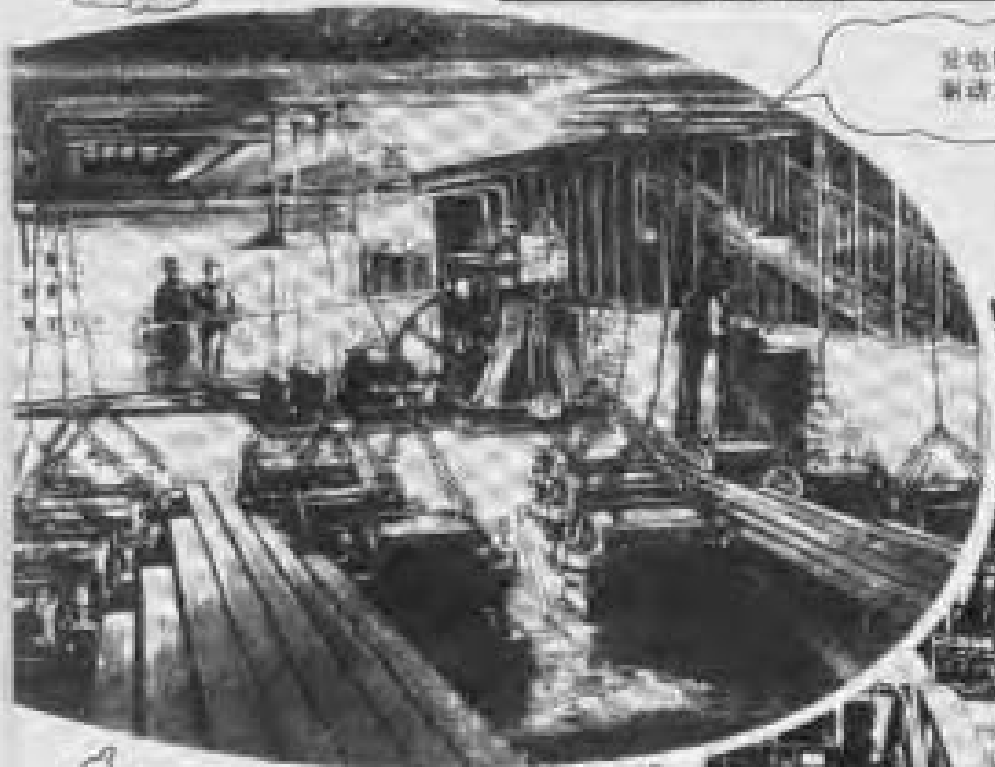


费兰蒂发电厂内景

费兰蒂交流电机



费兰蒂交流发电厂

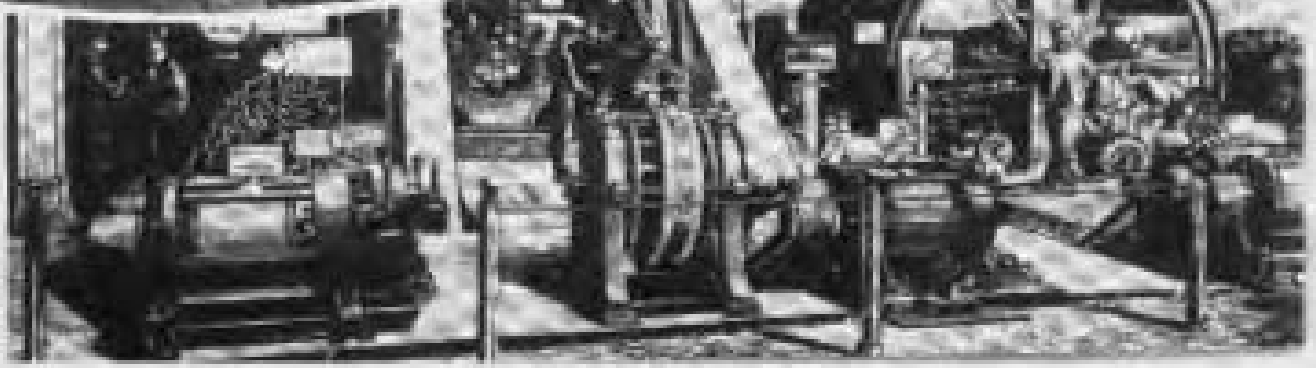


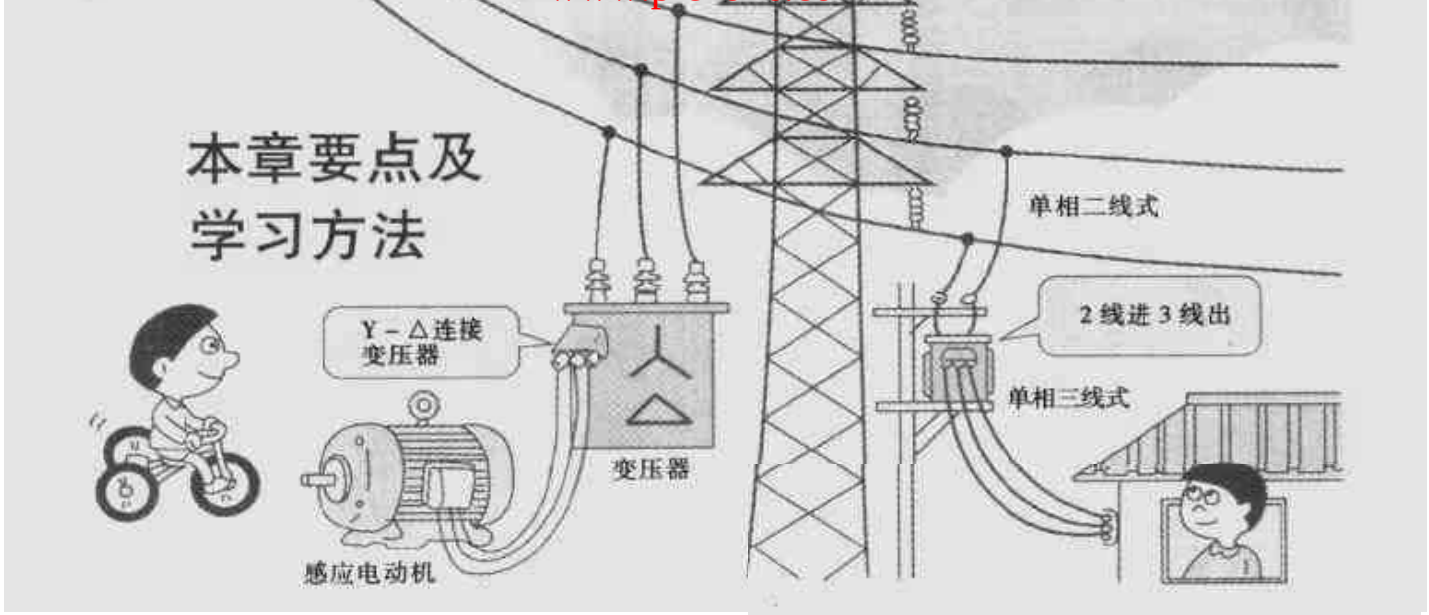
发电厂机房（发电机及其驱动方式是当时情况）

1881年巴黎国际电气博览会中的贝尔曼公司的发电设备



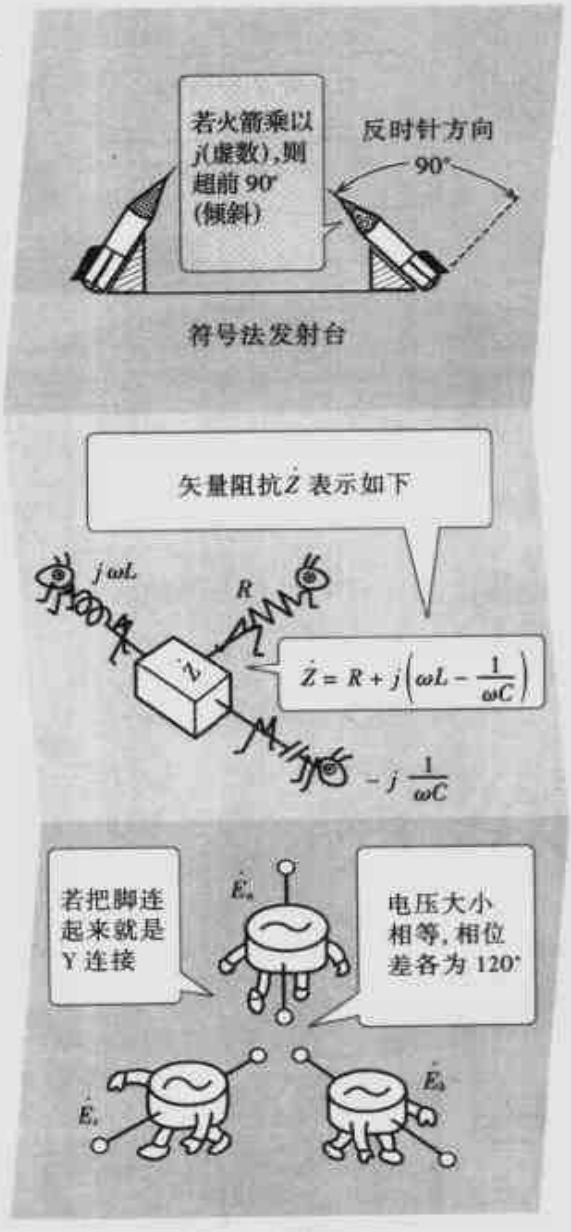







由第5章学习有关交流电的基础知识可知，用静止的图形表示周期性变化的交流电波形的方法就是**矢量法**。本章对于复杂的交流电路也用代数计算，这就需要学习计算方法，即采用**复数**（complex number）的方法。

复数用**实数**和**虚数**来表示，必须弄懂**虚数单位** $j$ 的含义。阻抗可用复数（也叫做**符号法**）表示，这样表示的是**矢量阻抗** $\dot{Z}$，如右图所示，给电抗添加一个 $j$ 就可进行合成计算（复数）。




有三个单相交流电源，大小相等而相位互差120°，这样的电压称为**对称三相交流电压**。一般，发电厂输送的电力几乎都是采取三相交流方式。由于三个电源电压采用三根电线进行输送，所以就有星形（Y）的和三角形（△）的两种接线方式。

**交流功率**可由现在**功率**与**功率因数**的乘积求得。这里要学习功率



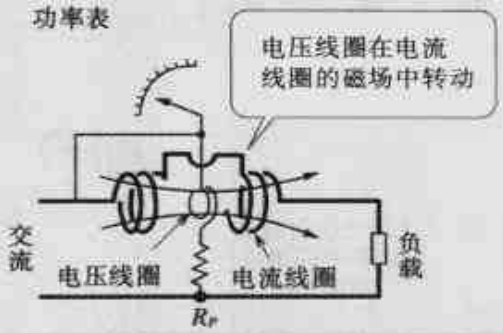
因数的意义，还要学习测量交流功率的**功率表**的结构。

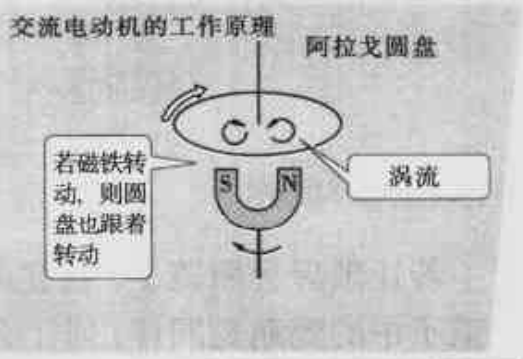
其次，要学习进行电压变换的变压器的原理。

至于我们身边的动力，有自行车的发动机以及家用电器的电动机。

发动机能输出较大**转矩**（torque），但存在噪声与排放有害气体的问题。从这点来看，交流电动机是无公害的动力源。

要学习电动机的转动原理。




## 本章要学习的内容

理解 $j$ 的意义，用复数表示矢量，交流电路的计算可使用符号法（复数）。（矢量阻抗的概念很重要。）

输送电力最好使用三相交流电。三相交流电是如何发出来的呢？学习电源与负载的三相连接方式。



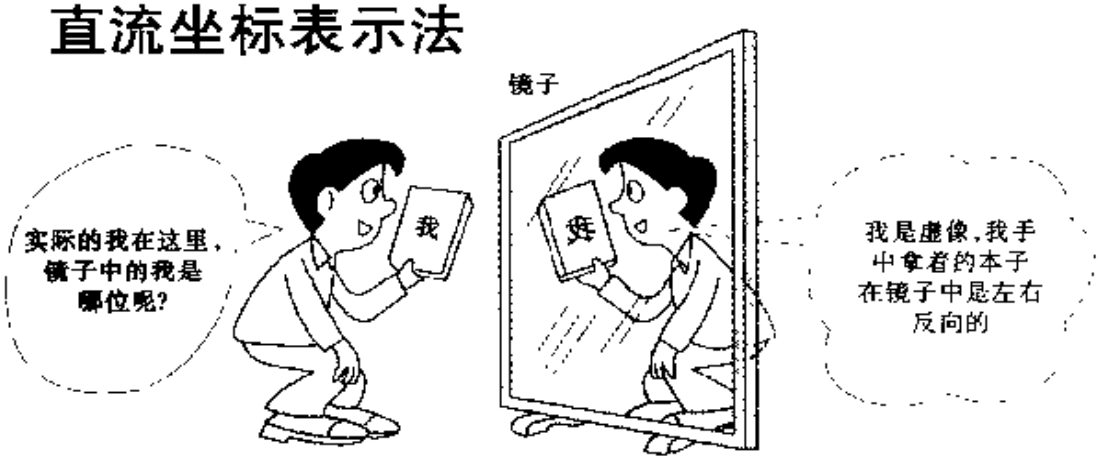

研究测量电感及电容值的交流电桥。学习向量轨迹的问题。



在交流功率中，负载的功率因数是一个重要的量，理解功率因数的意义，学习功率的测量方法。研究电力输送与变压器的基础知识等有关问题。

三相交流电压相位互差120°，可以简单地产生旋转磁场。学习感应电动机的转动原理。

# 1 直流坐标表示法




**虚拟(镜像)世界**

若让黑猩猩照镜子，它立刻就会觉得镜中的同伴就是自己。鹦鹉也深信镜子中的鹦鹉是同伴，到什么时候都可以说，大脑越发达的动物，就能越快地发觉镜中是自己的虚像。通过镜子或透镜看到的物体称为**虚像**(镜像)，实物称为实像。

在数学领域这种现象也可用平面表现出来。边长为 $x$ 米的正方形的面积为 $-4$ 平方米，试求 $x$ 的长度(图 1)。

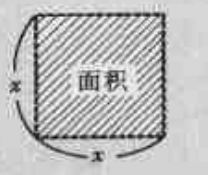



图 1 负面积?



$$x^2 = -4 \quad x = \pm\sqrt{-2^2} = \pm 2\sqrt{-1}$$

只是进行计算，但问题也很奇怪。面积为负值，从常识的角度来看是不可思议的。$x$ 即使为负值而面积也会变为正值吧。

例如，$x = -2$ 时的面积为 $x \times x = (-2) \times (-2) = +4$

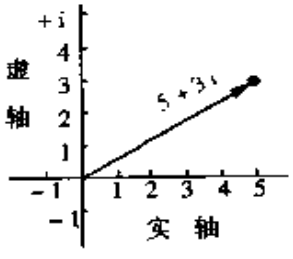
从常识(实数)的角度考虑，面积为负时 $x$ 的长度是求不出来的，但若考虑到虚数 $i$(英文“虚数”一词的首字母)，则如下所示：

若 $i = \sqrt{-1}$，则 $x = \pm 2i$(答案是 $2i$ 米或 $-2i$ 米)。

One point

实数与虚数的组合称为**复数**。

$5 + 3i$ 是复数，5 是实数，$3i$ 是虚数。如右图所示，$x$ 轴是实轴，$y$ 轴是虚轴。若这个复数是矢量，则用箭头表示。



## 电学中的“虚数”

在图 2(a) 中，流经 $RC$ 并联电路中电阻 $R$ 的电流 $\dot{I}_R$ 与电压 $\dot{V}$ 同相位(电灯点亮时要消耗功率)。流经电容的电流 $\dot{I}_C$ 的相位超前于电压 $\dot{V}$ 90°(电容的电抗 $X_C$ 具有控制电流的能力，但不消耗功率)。

以电压 $\dot{V}$ 为基准矢量 ( $+x$ 轴)，两个电流 $\dot{I}_R$ 和 $\dot{I}_C$ 的矢量合成如图 2(b)所示。

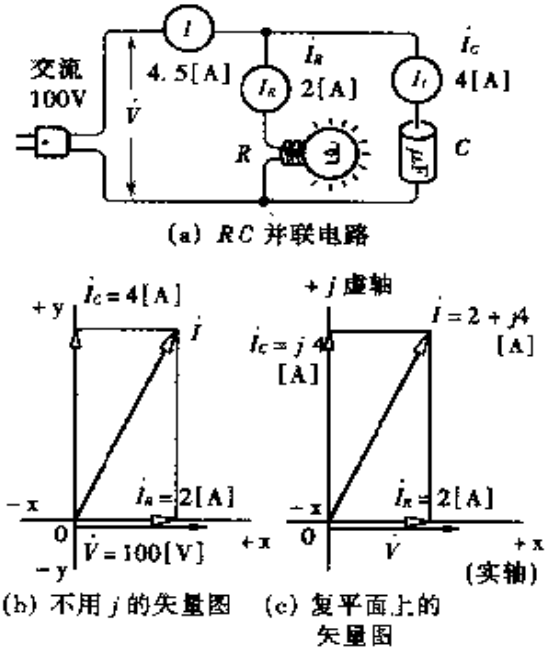



**图 2　$RC$ 并联电路的矢量图**

对于交流电路，功率不能简单地用电压 × 电流 = 功率的公式计算。实际上，消耗的功率在实轴上表示，不消耗的功率(电抗元件)在虚轴上表示，其矢量合成如图 2(c)所示。虚数在数学中用 $i$ 表示，但是由于在电学中电流瞬时值用 $i$ 表示，因此，按照字母的顺序，用紧跟 $i$ 后面的 $j$ 表示虚数。



### Let's try　$j$ 的意义

如右图所示，电压矢量 $\dot{V} = 4 + j2$ 与虚数 $j$ 相乘将变成什么样的矢量呢?

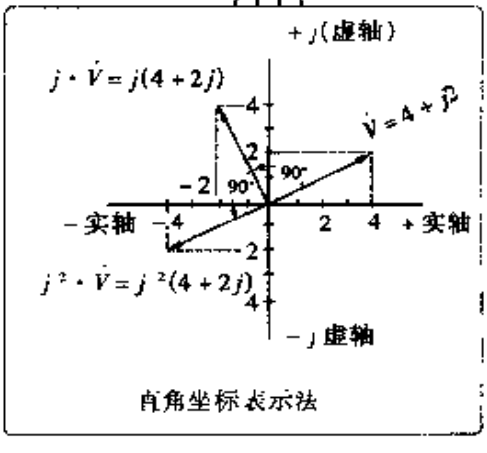
$$j \cdot \dot{V} = j(4 + j2) = j4 + j^2 2$$
$$= -2 + j4$$

$j = \sqrt{-1}$
$j^2 = -1$

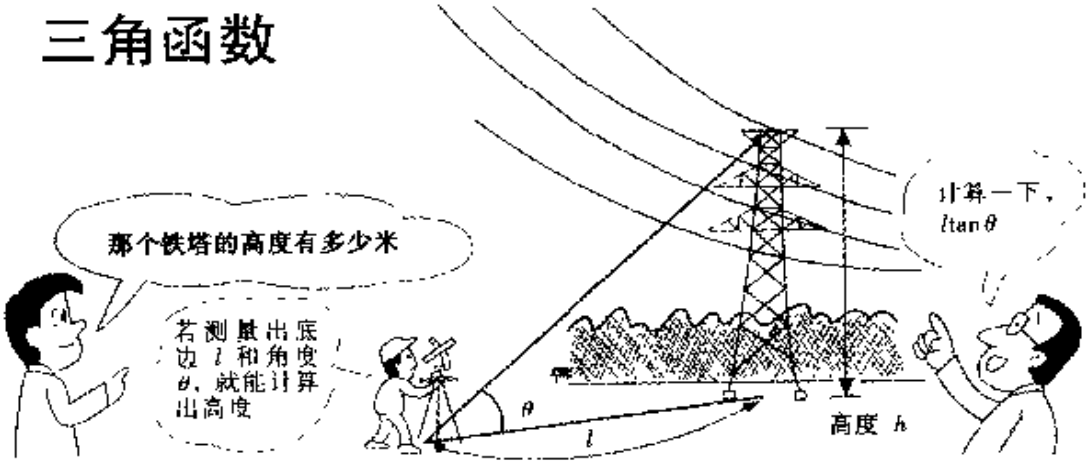
若乘以 $j$，就是原向量反时针旋转 90°，即向量超前于原向量 90°。

$$j^2 \cdot \dot{V} = j^2 (4 + j2) = -1 \cdot (4 + j2) = -4 - j2$$

若乘以 $j^2$，就意味着原矢量旋转 180°，即 $j^2$ 变为超前 180°的矢量，这就意味着原矢量乘以负号(−)，即 $j^2$ 就是将原矢量反方向。



# 2 三角函数




## 众所周知的勾股定理

可使用勾股定理(毕达哥拉斯定理)求出直角三角形的边长。

$$c^2 = a^2 + b^2$$

已知边长 $a$ 和 $b$，则未知边长 $c$ 为

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{不考虑负值})$$

求 $a$ 时，$a^2 = c^2 - b^2$　　$\therefore a = \sqrt{c^2 - b^2}$

求 $b$ 时，$b^2 = c^2 - a^2$　　$\therefore b = \sqrt{c^2 - a^2}$

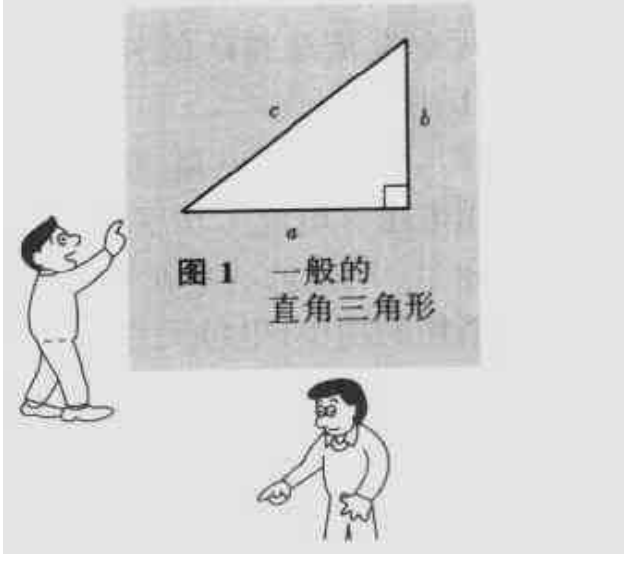



图 1　一般的直角三角形

One point　在电学中特别是在交流电路中，勾股定理是极其重要的。在计算矢量和复数大小时经常用它。

## 现在学习三角函数

**正弦、余弦和正切**是三角函数，在电学计算中要做到熟练地运用它们也有一定的困难。

对于电学上经常用到的三角函数来说，若图 2 中所示圆的半径 $r$ 是矢量，根据 $r^2 = x^2 + y^2$，$r$ 也可以用 $x$ 轴和 $y$ 轴来表示。

sin 称为正弦，cos 称为余弦，tan 称为正切。

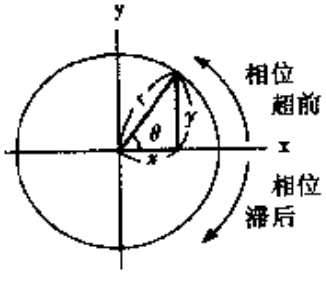



图 2　三角函数从画圆开始

【例题】 已知 $x$ 和 $y$ 的值，试求出矢量大小 $r$ 以及相位角 $\theta$。

【解】 求 $r$ 时，采用勾股定理，$r=\sqrt{x^2+y^2}$。求相位角 $\theta$ 时，采用三角函数的正切，则有

$$\tan\theta=\frac{y}{x} \quad \therefore \quad \theta=\tan^{-1}\frac{y}{x}$$

**$\tan^{-1}$ 称为反正切，是 $\tan\theta$ 的反函数。**

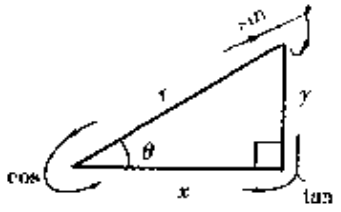
One point



按右图所示的画法来学习三角函数

$$\sin\theta=\frac{y}{r}\ ,\ \cos\theta=\frac{x}{r}\ ,\ \tan\theta=\frac{y}{x}$$

$$x=r\cos\theta\ ,\ y=r\sin\theta\ ,\ y=x\tan\theta$$



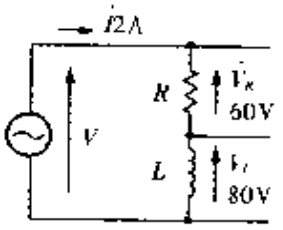

这种画法容易记住

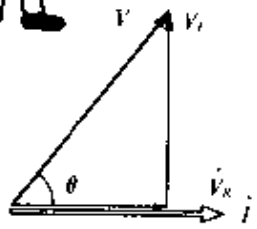
Let's try

## 强迫用三角函数进行计算



已知 $RL$ 串联电路中各元件的电压与电流，试求出电源电压的大小 $V$ 以及电流的相位角 $\theta$。




【解】 $V=\sqrt{V_R^2+V_L^2}$ （勾股定理）

$=\sqrt{60^2+80^2}=\sqrt{10000}$

$=100[\mathrm{V}]$

试用 tan 求出相位角 $\theta$。

$$\tan\theta=\frac{V_L}{V_R}=\frac{80}{60}\approx 1.33$$

查右表可知，$\tan\theta$ 最接近 1.33 时 $\theta$ 是 53°。

$$\theta=\tan^{-1}1.33\approx 53^\circ$$

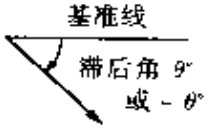
数学类教科书中附有三角函数表。首先找到表中的 tan。

| 角度 $\theta$ | 52° | 53° | 54° |
|---|---|---|---|
| $\tan\theta$ | 1.280 | 1.327 | 1.376 |

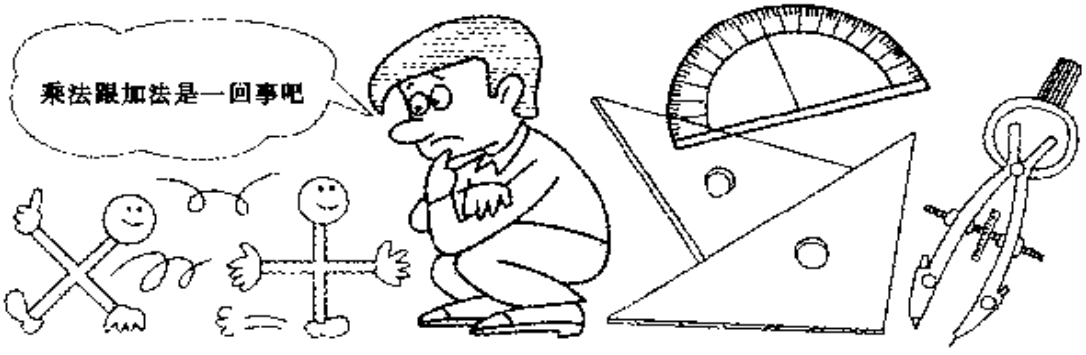
若以电流 $I$ 为基准矢量，电压 $V$ 沿反时针方向旋转，即超前于电流 53°。相反，若以电压 $V$ 为基准矢量，则电流 $I$ 滞后于电压 53°(或 $-53°$)。

若用计算器，只要按键就行，答案也是正确的。





# 3 极坐标表示法




## 用圆规和量角器表示的极坐标

矢量 $A$ 可用复数 $a + jb$ 来表示（直角坐标法）。

表示 $\dot{A}$ 的大小和方向可以用表示大小的绝对值 $A$ 和从一定的基准线算起的相位角 $\theta$ 来表示。

$$\dot{A} = A\angle\theta$$

这种表示方法称为**极坐标**表示法。

为了用图来表示 $\dot{A} = 4\angle 30°$，用圆规画出半径为 4cm 的圆弧，用量角器量出从 $x$ 轴起算的 30°角，从圆心到圆弧画一条引线，在其末端画上箭头，这样 $A$ 的矢量图就画出来了（图 1）。

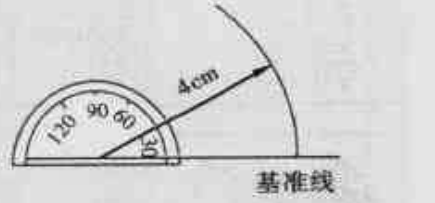



图 1　极坐标表示法

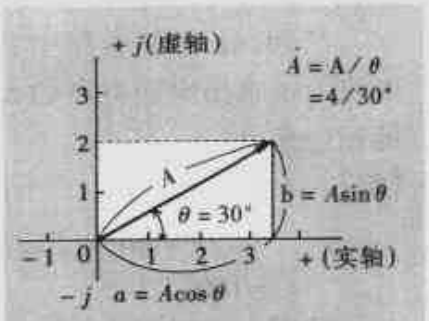



图 2　直角坐标表示法

为了用直角坐标法表示 $\dot{A} = A\angle\theta$，如图 2 所示，求出实部与虚部的大小。



$$a = A\cos\theta = 4\cos 30° = 4 \times 0.866 = 3.46$$

$$b = A\sin\theta = 4\sin 30° = 4 \times 0.5 = 2$$

$$\dot{A} = a + jb = 3.46 + j2 \cdots \boxed{\text{直角坐标表示法}}$$

$$= A\angle\theta = 4\angle 30° \cdots \boxed{\text{极坐标表示法}}$$

$\boxed{\text{符号法}}$

直角坐标法和极坐标法都要学会使用。

One point　极坐标法适用于矢量积和商的计算，这很容易理解。然而，若用于加减运算，则计算变得非常复杂。

## 矢量积的求法

试对下述两个矢量进行乘法运算。计算方法跟代数计算相同，最后归纳成实数与虚数。

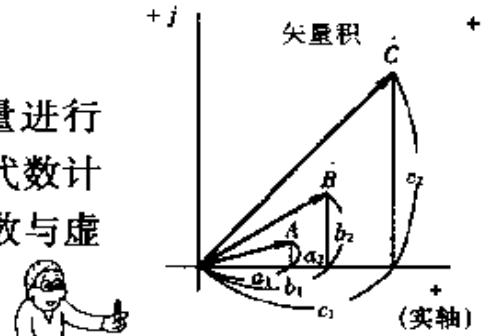



图 3　由直角坐标求矢量积

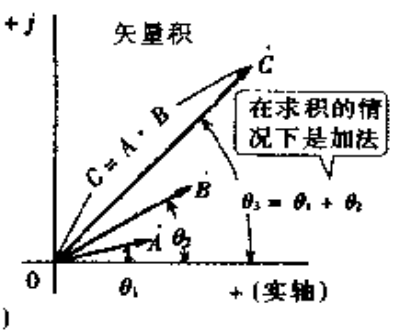



图 4　由极坐标求矢量积



$$\dot{A} = a_1 + ja_2$$

$$\dot{B} = b_1 + jb_2$$



$$\dot{C} = \dot{A}\dot{B} = (a_1 + ja_2)(b_1 + jb_2)$$

$$= (a_1 b_1 - a_2 b_2) + j(a_1 b_2 + a_2 b_1) = c_1 + jc_2 \cdots\cdots \text{直角坐标表示法}$$

$\dot{A}\dot{B}$ 的积 $\dot{C}$ 如图 3 所示，可以用实数 $c_1 = a_1 b_1 - a_2 b_2$，虚数 $c_2 = a_1 b_2 + a_2 b_1$ 表示矢量。

再试用极坐标法求出两个矢量之积(图 4)。

$$\dot{A} = a_1 + ja_2 = A\underline{/\theta_1}$$

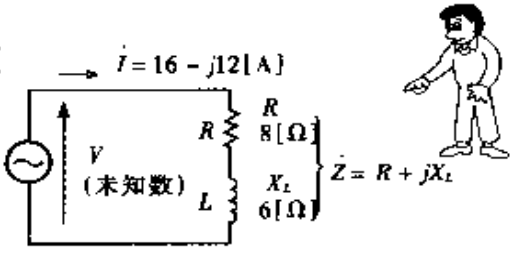
大小 $A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ (勾股定理)

$$\dot{B} = b_1 + jb_2 = B\underline{/\theta_2}$$

$\dot{C} = \dot{A}\dot{B} = AB\underline{/\theta_1 + \theta_2}$ = 大小($\dot{A}\cdot\dot{B}$ 的绝对值之积) $\underline{/\dot{A},\dot{B}\text{ 的相位角之和}}$。

### Let's try　试把矢量积用于电学计算

在右图所示的 $RL$ 串联电路中，已知电流矢量 $\dot{I}$ 与阻抗矢量 $\dot{Z}$ 时，试求电源电压矢量 $\dot{V}$。




(a) 电路图

$$\dot{Z} = 8 + j6 = 10\underline{/37°}\ [\Omega]$$

$$\dot{I} = 16 - j12 = 20\underline{/-37°}\ [\text{A}]$$

$$\dot{V} = \dot{Z}\dot{I} = ZI\underline{/\theta_1 + /\theta_2}$$

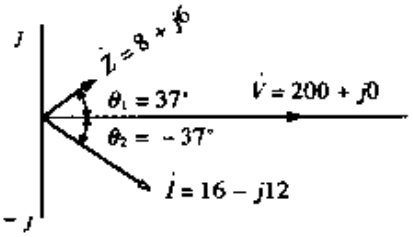
$$= 10 \times 20\underline{/37° - 37°} = 200\underline{/0°}\ [\text{V}]$$

即，$\dot{V}$ 的大小为 200V，相位角为 0°。

用直角坐标法表示时

$$\dot{V} = \dot{Z}\dot{I} = (8 + j6)(16 - j12)$$

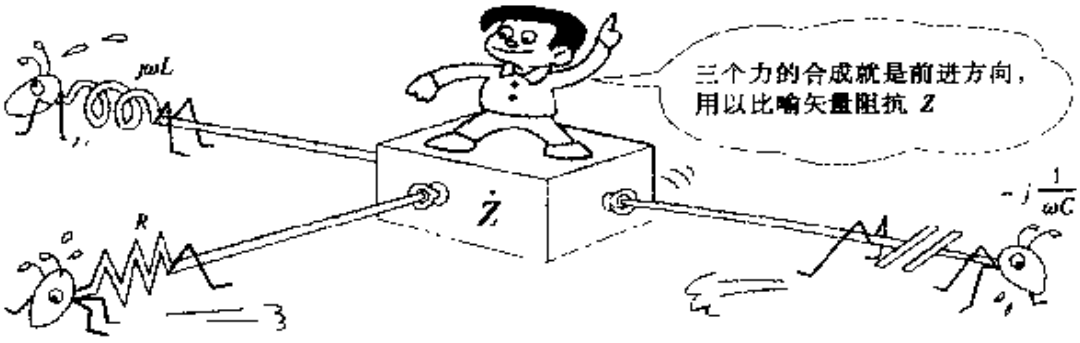
$$= 200 + j0 = 200\ [\text{V}]$$




(b) 向量图



## 4 RLC 电路的计算




### 小　结

试对迄今已学过的有关交流电路中 $R$、$L$、$C$ 的作用等重点进行归纳。

| 符号名称 | 电　阻　$R$ | 电　感　$L$ | 电　容　$C$ |
|---|---|---|---|
| 代表的元件名称 | 电阻器<br>灯泡 | 线圈<br>扼流圈 | 电容器<br>可变电容器 |
| 施加交流电压的电路 | $\dot{I}$ → $R$ [Ω] $R$ [Ω] $\dot{V}$ | $\dot{I}$ → $L$ [H] $jX_L$ [Ω] $\dot{V}$ | $\dot{I}$ → $C$ [F] $-jX_C$ [Ω] $\dot{V}$ |
| 控制交流电压阻抗的名称 | 电阻 $R$[Ω] | 感抗 $X_L$<br>$X_L=\omega L=2\pi fL$[Ω] | 容抗<br>$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}$[Ω] |
| 用符号法表示的阻抗 $\dot{Z}$ | $\dot{Z}=R$[Ω]<br>向量阻抗 | $\dot{Z}=jX_L=j\omega L$[Ω] | $\dot{Z}=-jX_C=\frac{1}{j\omega C}$[Ω] |
| 矢量图 | $I=\frac{\dot{V}}{\dot{Z}}=\frac{\dot{V}}{R}$<br>$\dot{I}$ 和 $\dot{V}$ 同相位<br>$\dot{I}$ $\dot{V}$ | $I=\frac{\dot{V}}{\dot{Z}}=\frac{\dot{V}}{jX_L}=-j\frac{\dot{V}}{X_L}$<br>$\dot{I}$ 比 $\dot{V}$ 多个 $-j$(滞后 90°)<br>$\dot{V}$ $\dot{I}$ | $\dot{I}=\frac{\dot{V}}{\dot{Z}}=\frac{\dot{V}}{-jX_C}=j\frac{\dot{V}}{X_C}$<br>$\dot{I}$ 比 $\dot{V}$ 多 $+j$(超前 90°)<br>$\dot{I}$ $\dot{V}$ |

## 何谓矢量阻抗$\dot{Z}$




阻抗也称为交流电阻，因此，对交流电压来说就是电流阻力的总称。

电阻 $R$、感抗 $X_L$、容抗 $X_C$ 组合构成的阻抗就是 $R$、$X_L$、$X_C$ 各自的大小与相位的组合，因此，也称为矢量阻抗 $\dot{Z}$。

求出 $RLC$ 串联电路的阻抗 $\dot{Z}$ 时，不能用电阻和电抗的代数和，即 $Z = R + X_L + X_C$ 的公式。感抗相对于电阻相位超前 90°，容抗相对于电阻相位滞后 90°，因此，$\dot{Z}$ 可表示如下：

$$\dot{Z} = R + j(X_L - X_C)\ [\Omega] = Z\angle\theta \quad \text{(极坐标表示法)}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\ \ [\Omega] \qquad \theta = \tan^{-1}\frac{X_L - X_C}{R}$$

### Let's try　$RLC$ 电路的矢量计算

对于右图所示 $RLC$ 串联电路，请求出矢量阻抗 $\dot{Z}$ 和电流 $\dot{I}$。

【解】 $\dot{Z} = R + j(X_L - X_C)$

$= 8 + j(10 - 4) = 8 + j6\ [\Omega]$

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

$= \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{100}$

$= 10\ [\Omega]$

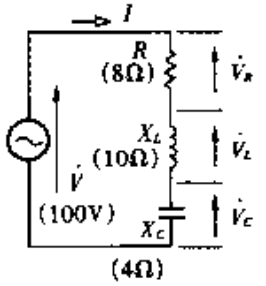
$\tan\theta = \dfrac{X_L - X_C}{R} = \dfrac{6}{8} = 0.75$

$\therefore\ \theta = \tan^{-1}0.75 = 37°$

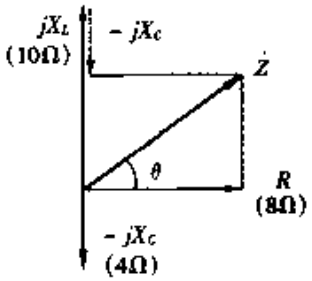
计算流过电路的电流 $\dot{I}$，则有

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{V\angle 0° - \theta°}{Z\angle\theta} = \frac{100\angle 0 - 37°}{10\angle 37°} = 10\angle -37°$$

大小为 10 [A]，相位角为 −37°

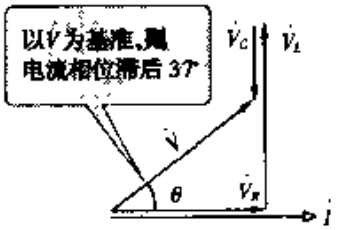



(a) $RLC$ 串联电路图




(b) 阻抗的矢量图

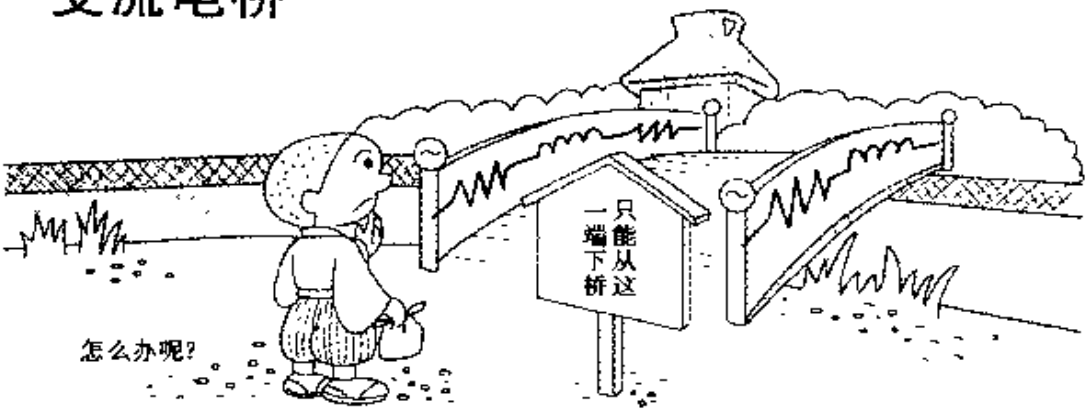
| 摘自三角函数表 | |
|---|---|
| 角度 $\theta$ | $\tan\theta$ |
| 36 | 0.727 |
| 37 | 0.754 |
| 38 | 0.781 |




(c) 电压矢量图



# 5 交流电桥




## 测量电阻值的各种仪表

测量电阻值有各种方法。有用**电压表**和**电流表**求出未知电阻值的方法，用万用表中**欧姆档**直读电阻值的方法，电阻的精密测量使用**惠斯登电桥**。用这些方法测量电阻值的范围为**中等范围**(几欧到几十万欧)。

测量**高阻值**(高于几十万欧)电阻要使用**摇表**(绝缘电阻表)。测量**低阻值**电阻使用**双电桥**，双电桥也可以用来测量粗电线的电阻值。

有关惠斯登电桥的原理正如已经学过的那样，为了测量未知电阻 $X$，调节比例臂 $P$、$Q$ 以及可变电阻 $R$，使检流计的指针处于无偏转的状态。这称为电桥的平衡，此时下述关系式成立：

$$PR = QX$$

$$\therefore \quad X = \frac{P}{Q} \cdot R \quad [\Omega]$$




如右边插图所示考虑这个关系式，若看作是围裙的系带就非常简单吧。

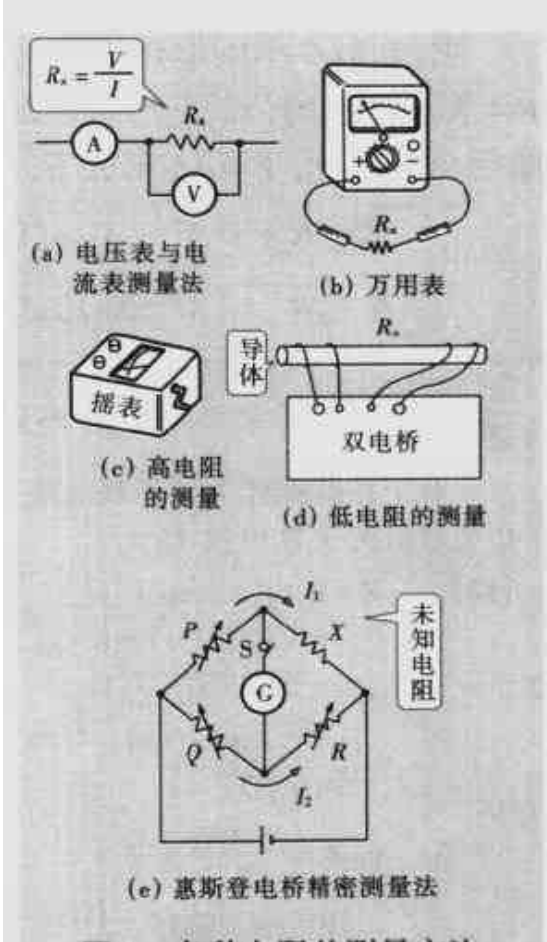



图 1 各种电阻的测量方法

惠斯登
Wheatstone Sir Charles
1802 - 1875 (英国物理学家、发明家)

## 与未知量相遇——交流电桥

这里学习有关测量 $L$ 与 $C$ 的未知量的方法。一般来说，$L$、$C$ 在施加交流电压时呈现的阻抗，可以用图 2 所示的交流电桥进行测量。

图 2(a)中的$\dot{Z}$ 是未知的阻抗，改变$\dot{Z}_1$ 、$\dot{Z}_2$ 、$\dot{Z}_3$ 的值，检流计 $D$ 中无电流时电桥平衡条件的关系式成立。

$$\dot{Z}_1\dot{Z}_3 = \dot{Z}_2\dot{Z}_4$$

图 2(b)中 $P$、$Q$ 是可变电阻，$C_s$ 是标准电容。测量未知电容 $C_x$ 时，根据平衡条件关系式，

$$\dot{Z}_1 = P,\quad \dot{Z}_2 = Q,\quad \dot{Z}_3 = \frac{1}{j\omega C_s},\quad \dot{Z}_4 = \frac{1}{j\omega C_x}$$

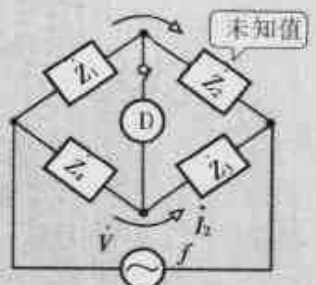
则有

$$P\left(\frac{1}{j\omega C_s}\right) = Q\left(\frac{1}{j\omega C_x}\right) \quad \text{所以} \quad C_x = \frac{Q}{P}C_s \ [\mathrm{F}]$$

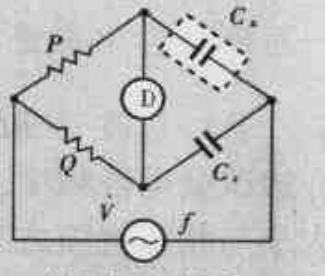
消去 $j\omega$

与振荡器的电压和频率无关






(a) 交流电桥的基本电路

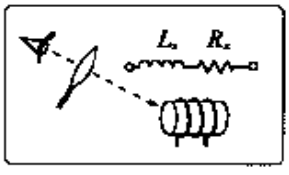


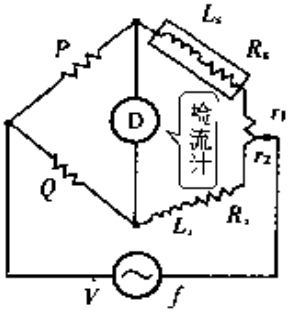

(b) 测量电容 $C_x$

图 2　交流电桥

### 试研究未知线圈的参数

线圈具有自感 $L_x$ 和不能忽略的有效电阻 $R_x$。为了测量线圈参数，试用右图所示的麦克斯韦电桥测量 $L_x$ 和 $R_x$。




调节电桥使检流计指零，根据平衡条件关系式

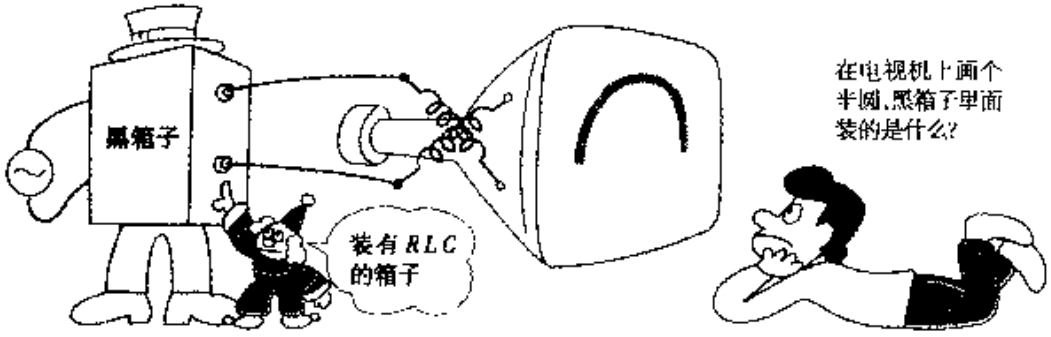
$$P(R_x + r_2 + j\omega L_x) = Q(R_x + r_1 + j\omega L_x)$$

由实部 $P(R_x + r_2) = Q(R_x + r_1)$，求出未知电阻 $R_x = \frac{P}{Q}(R + r_2) - r_1$ [Ω]

由虚部 $j\omega L_x P = j\omega L_x Q$，求出自感 $L_x = \frac{P}{Q}L_x$ [H]



# 6 矢量的轨迹




## 一直延伸的 $\dot{Z}$ 轨迹

若一边改变 *RLC* 中任一个元件的数值，一边改变电源频率，则电压、电流、阻抗等的大小与相位就随之改变。这时，若把变化的矢量的箭头端连接起来，时而是一直线，时而是一个圆。这线或圆称为**矢量端轨迹**。

在图 1(a) 的 ***RLC* 串联电路**中，**改变电源频率时**，阻抗的轨迹是怎样的呢？



由式 $\dot{Z}=R+j\left(\omega L-\dfrac{1}{\omega C}\right)$

❶ 频率较低时，由 $\omega L-\dfrac{1}{\omega C}<0$，有，

$\dot{Z}=R\boxed{-jX_C}$ ← 与电容电路的状态相同

❶ 处于谐振频率时，由 $\omega_0 L-\dfrac{1}{\omega_0 C}=0$，则有

$f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，$\dot{Z}=R$ ← 与纯电阻电路的状态相同

❸ 频率较高时，由 $\omega L-\dfrac{1}{\omega C}>0$，则有

$\dot{Z}=R\boxed{+jX_L}$ ← 与电感电路的状态相同

由此可知，$\dot{Z}$ 的轨迹是条直线。

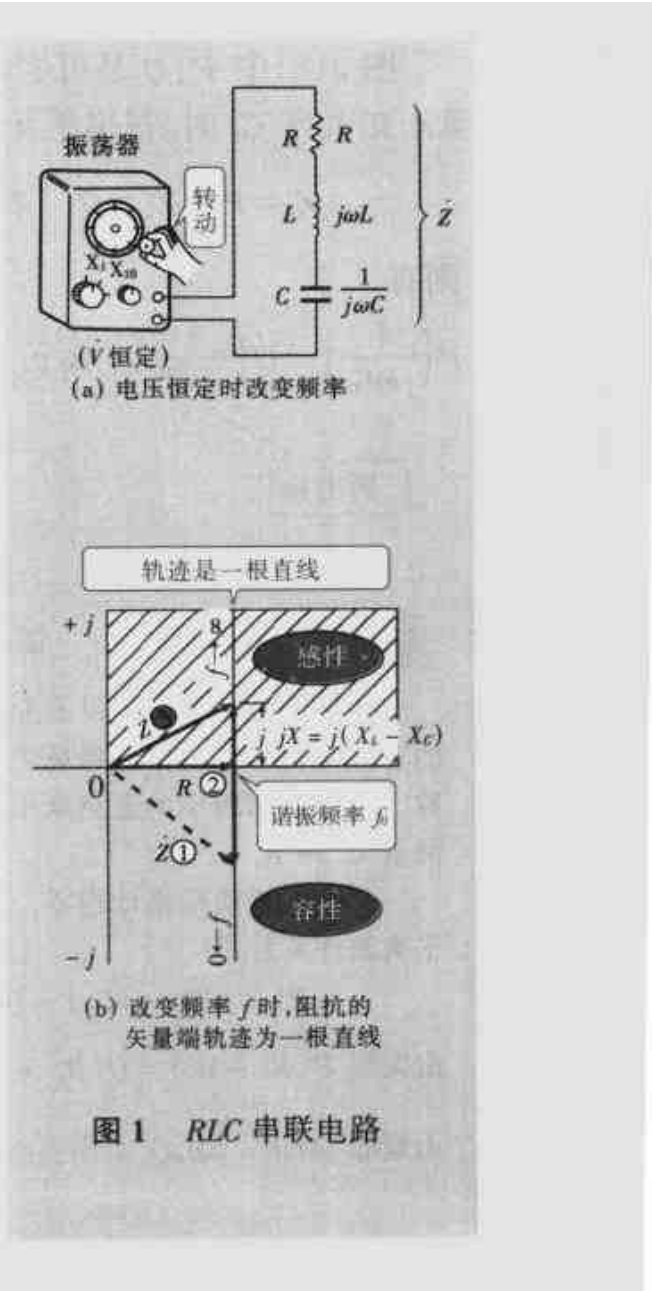


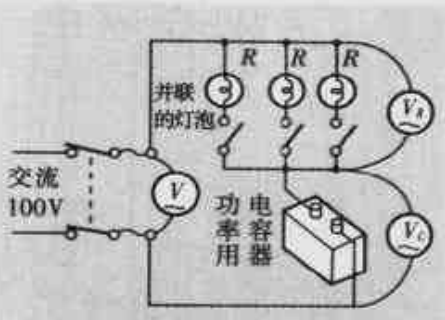

图 1 *RLC* 串联电路

## 圆周上移动的电压轨迹

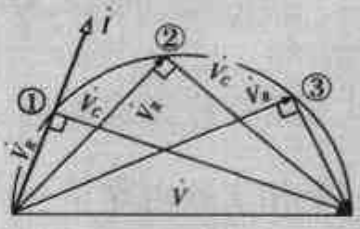
在图 2 所示的 ***RC* 串联电路中，改变电阻时**，试研究 *RC* 各自的电压矢量。

情况❶与并联的灯泡连接的开关全部接通，电阻为最小值(总电阻 $R_0 = R/3$)。这时，电流 $\dot{I}$ 的相位超前于电源电压 $\dot{V}$，$R$ 与 $C$ 中流过同一电流，因此，$\dot{V}_R = \dot{I}R$，$\dot{V}_C = -j\dot{I}/\omega C$。$\dot{V}_R$ 与 $\dot{I}$ 同相位，$\dot{V}_C$ 的相位滞后于 $I$ 90°。以电压 $\dot{V}$ 为基准画出的矢量图如图 2(b)中❶所示。

再看看仅接通两个灯泡的开关的场合，电阻比情况❶大 ($R_0 = R/2$)。$\dot{V}_R$ 当然比❶时大，$\dot{V}_R$ 与 $\dot{V}_C$ 的相位差为 90°，画出的矢量图如图 2(b)中❶所示。




(a) 若改变电阻，电压将如何变化呢




(b) 电压的矢量端轨迹为半圆

图 2　*RC* 串联电路

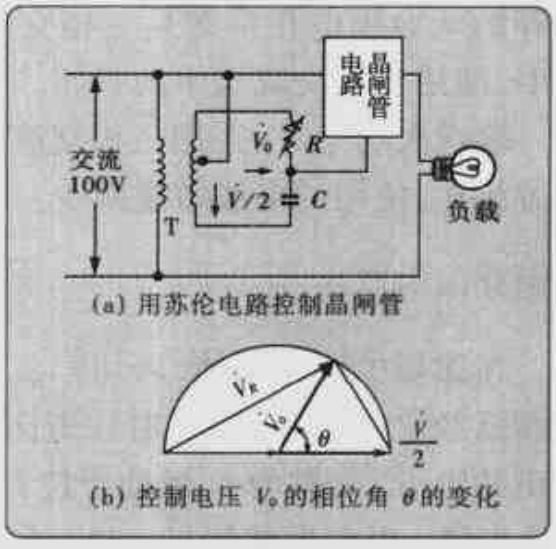
最后看看仅接通 1 个灯泡的开关的场合，电阻最大($R_0 = R$)。$V_R$ 比❶时大，轨迹如图 2(b)中❶所示。由此，电阻在 0 到∞之间改变时，$V_R$ 的矢量端在半圆周上移动。



### 用晶闸管 SCR 调光

为了使电灯时明时暗，改变加在与灯泡串联的晶闸管 SCR 上的电压(相位控制)即可。这种相位控制电路称为**苏伦电路**。右图(a)中的电源变压器 $T$ 带有中心抽头，在这电源中可变电阻 $R$ 和电容 $C$ 串联。控制电压 $V_0$ 是中心抽头与 $RC$ 的连接点之间产生的电压。

若调节苏伦电路中电阻，电阻电压 $V_R$ 矢量端画出的轨迹是个半圆，因此，控制电压 $V_0$ 就是半圆的半径，它与电源电压 $\dot{V}/2$ 之间的角度 $\theta$ 可在 0～180°之间变化。用这个相位角控制 SCR，就可以进行调光。




(a) 用苏伦电路控制晶闸管

(b) 控制电压 $V_0$ 的相位角 $\theta$ 的变化

# 7 三相交流电的产生




## 应以三相交流方式输电

单相交流电是从一个电源出发以两根线进行输送（有时也称为单相三线制）。与此相对应，**三相交流**则从三个电源（电压大小相等，相位差互为120°的三个电源）出发，以三根线进行输送。

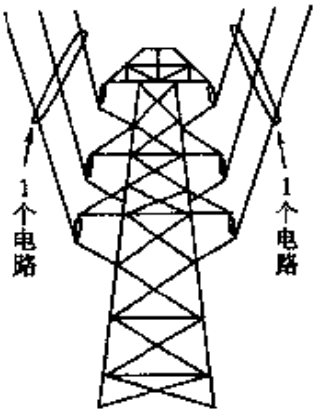



**图 1** 三相交流电的两个回路

在图 1 所示的输电线路中，铁塔左臂的 3 根线是三相交流电路中的 1 个回路，因此，总共用 2 个回路进行输送。在日本从发电厂送出的电几乎都是以三相交流方式输送。用电量大的工厂及大楼等的动力用电几乎都是三相交流电，在一般家庭中，使用三相交流当中的一相，通过两根电线，以单相方式供电。

输送大功率时，采用三相交流的原因何在呢？从输电线路来看，与单相交流相比，使用的**电线数量**减少。从负载方来看，可以产生**旋转磁场**等。

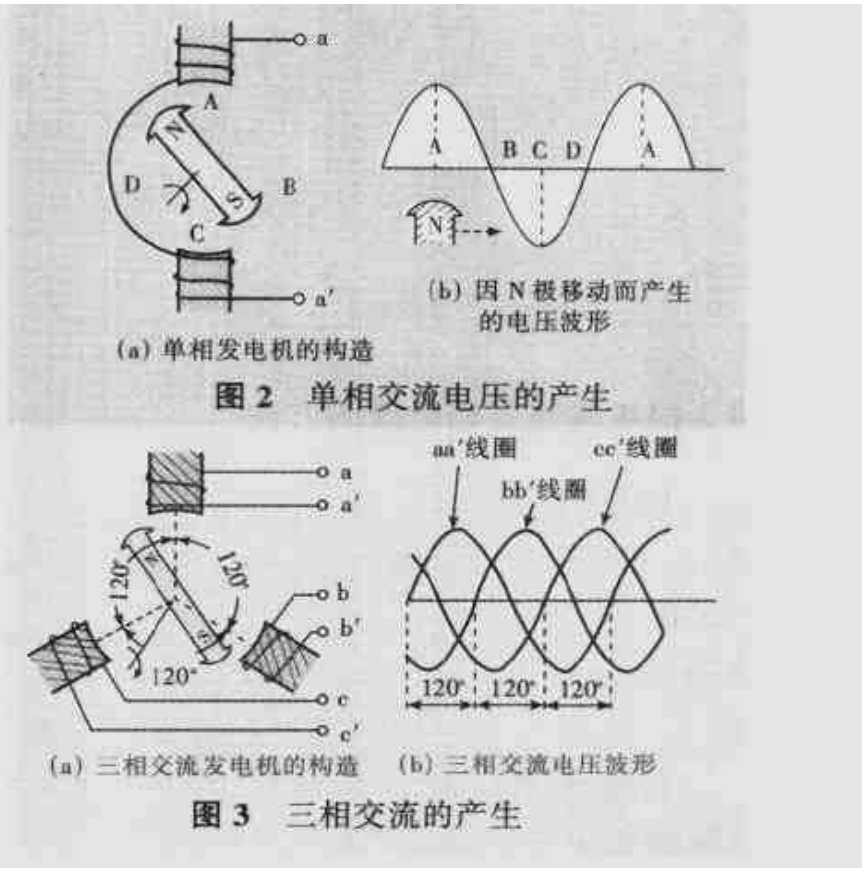
## 三相交流的产生

在磁场中移动导体，若切割磁力线，导体中就会产生感应电动势，这在前面已经学习过。若按顺时针方向转动图 2 中的磁铁，在线圈 aa′中就会产生正弦电压，磁铁的 N 极处于位置 A 时正弦电压为正的最大值，处于位置 B 时为零。现在再准备与 aa′相同的两个线圈，三个线圈如图 3 所示那样排列，相互错开 120°配置。

若按顺时针方向转动磁铁，则在线圈 bb′中产生相同的感应电动势，但

其相位滞后于 aa′120°，cc′也产生相同的感应电动势，但其相位滞后于 bb′ 120°。与磁铁的转动角相一致画出的波形如图 3(b)所示。

这样的电压称为三相交流电压。也可以看作是三个单相交流电源，其电压大小相等，相位互差 120°，电线也要用 6 根吧。实际上三相交流电用 3 根线就够了，但如何连接呢？这个问题将在下章学习。




**One point** 用数学表达式表示三相交流的瞬时值

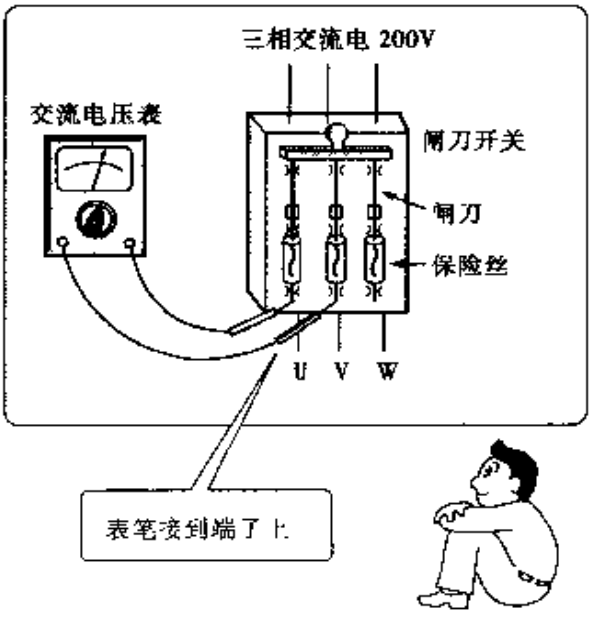
$v_{aa'} = E_m \sin \omega t$

$v_{bb'} = E_m \sin(\omega t - 120°)$

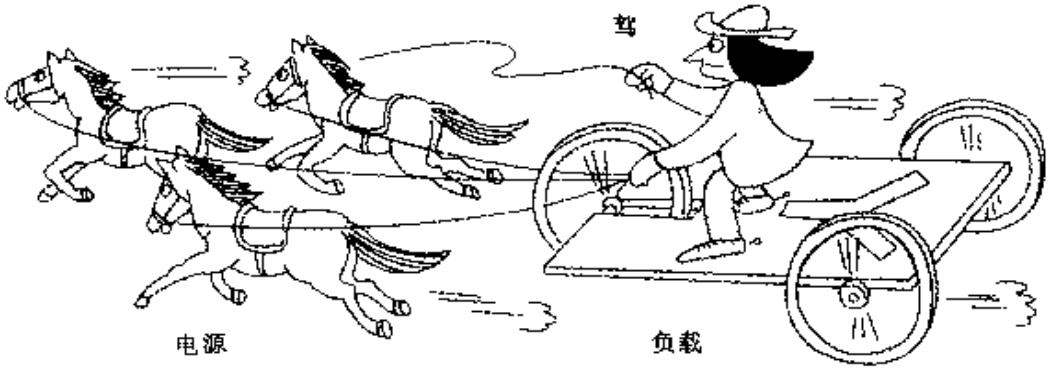
$v_{cc'} = E_m \sin(\omega t - 240°)$

**Let's try** 试测量动力配电盘的电压

右图所示是经由闸刀开关输送三相交流电。三个闸刀分别记有 U V W 标记，试测量各闸刀间的电压（线电压），则有 $E_{UV} = 200[\mathrm{V}]$，$E_{VW} = 200[\mathrm{V}]$，$E_{WU} = 200[\mathrm{V}]$，即三个线间电压都相同。（电压表只能测量电压的大小，不能测量电压间的相位差。）



# 8 Y－Y 连接




## 用 3 根线输送三相电源的方法

如图 1(a)所示，相位互差 120° 的三个电源各自连接负载。

若返回的电流都集中于 1 根线，则如图 1(b)所示，三个电流的矢量和变为零（参见图 1(d)）。

也就是说，中线 00′ 里无电流流通，因此，这根线可以除掉，这样就变成图 1(c)那样，一般输电采用三相 3 线式。

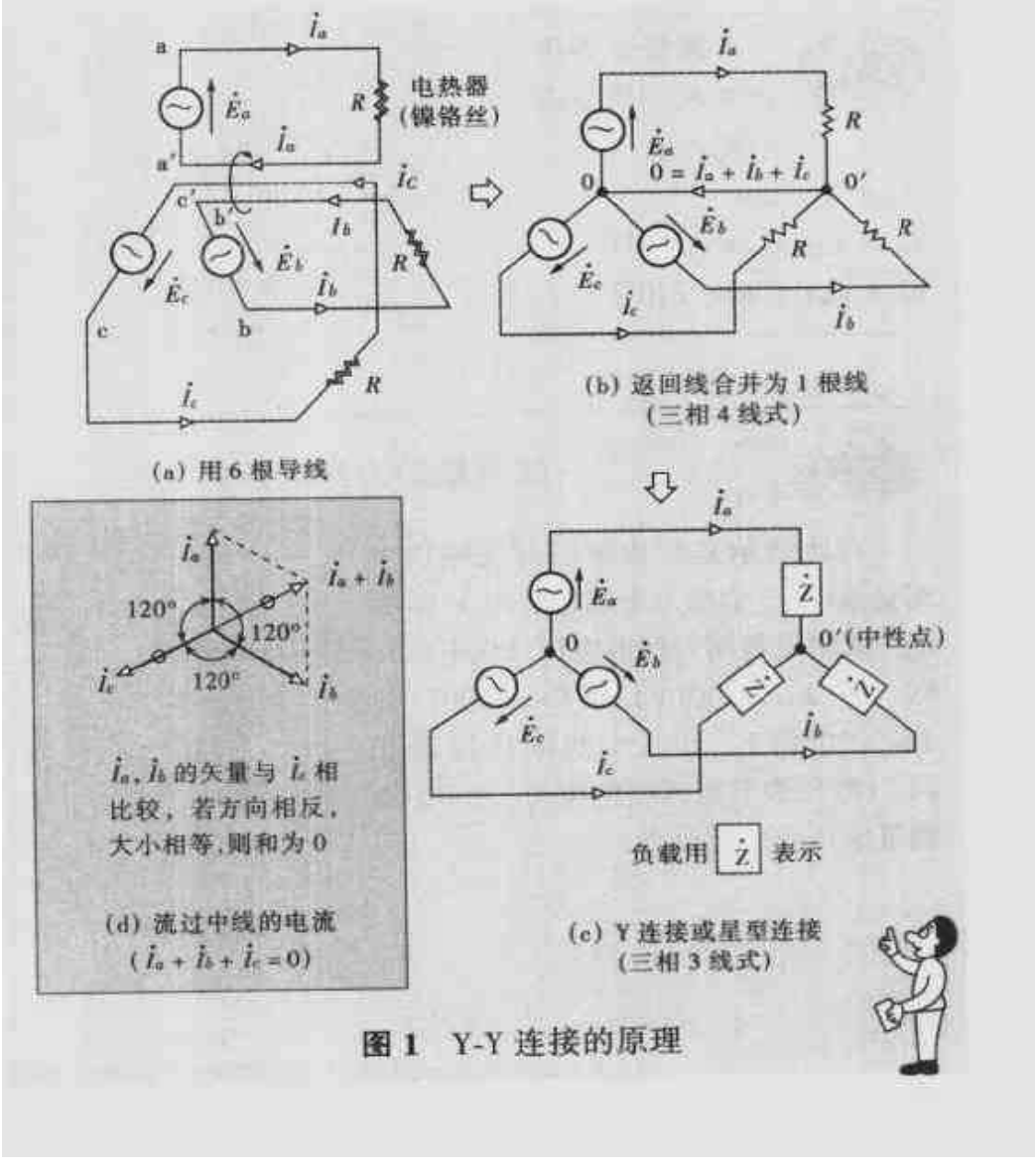



图 1　Y-Y 连接的原理

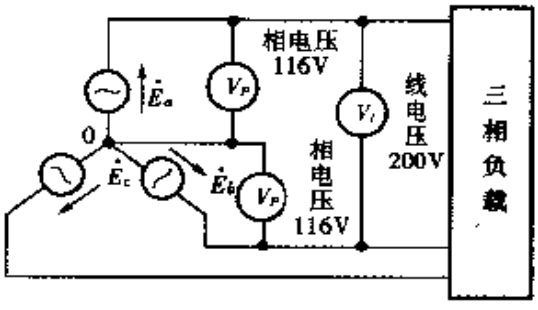
## Y 形连接时相电压和线电压之间的关系

图 1(c) 所示的三相电源或三相负载的连接犹如 Y 字形，因此，称为 Y 形连接或星形连接。这时，电源和负载都是采用 Y 形连接，所以称为 **Y－Y 连接**。

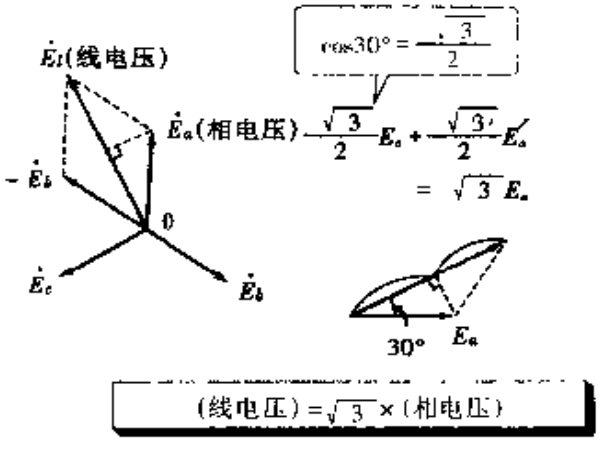
图 2(a) 中的 $\dot{E}_a$，$\dot{E}_b$，$\dot{E}_c$ 称为**相电压**，若测量其大小，则有

$$E_a = E_b = E_c = 116\ [\mathrm{V}]$$

$E_a$ 和 $E_b$ 的两端电压称为线电压 $E_l$，若测量其大小，则 $E_l = 200$ [V]。(该线电压 $\dot{E}_l$ 就是 $\dot{E}_a$ 和 $\dot{E}_b$ 两端的电压，即 $\dot{E}_{ab}$。令哪边为正电压，那边就是正电压。然而，ab 间、bc 间、ca 间的三个线电压均可用 $E_l$ 表示。对于相电压 $\dot{E}_a$，$\dot{E}_b$，$\dot{E}_c$ 一般的表示方法使用 $\dot{E}_p$。)




(a) Y 连接的相电压与线电压的测量




(b) Y 连接的向量图

**图 2　Y 连接时相电压与线电压之间的关系**

由图 2(b) 的矢量图可知，相电压与线电压之间的关系为 $E_l = \sqrt{3}E_a$，若代入数值，则 $E_l = \sqrt{3} \times 116 = 200$ [V]，这与测量值一致。



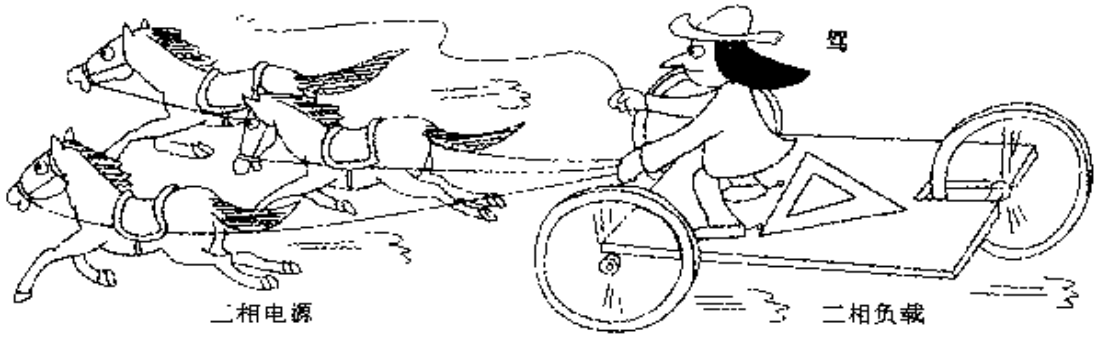
### 相电压与线电压之间的关系

由图 2 可知，Y 形连接时相电压 $E_p$ 与线电压 $E_l$ 之间关系为 $E_l = \sqrt{3}E_p$。其道理可用矢量图来说明。

图 1(a) 所示电源的线电压 $\dot{E}_{ab}$ 是相电压 $\dot{E}_a$ 和 $-\dot{E}_b$ 相加的矢量和，即 $\dot{E}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b$，用矢量图表示即为图 2(b) 的左图 ($\dot{E}_{ab} = \dot{E}_l$) 所示。

求 $\dot{E}_{ab}$ 的大小时，即 $E_{ab} = E_l = 2 \times E_a \cos 30° = \sqrt{3}E_a$ (电源电压的符号使用 $E$，负载电压的符号使用 $V$)。

## △－△连接




### 三角形连接



为了产生三相交流电压，如图 1(a) 所示，若令位于三个线圈中的磁铁匀速旋转，就在各线圈中产生相电压 $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$, $\dot{E}_c$。

如何连接才能使相电压和线电压相等呢?

如图 1(c)所示，把 a′和 b，b′和 c，c′和 a 连接起来，构成△连接，若按反时针方向旋转 30°就变成图 1(d)那样。一般用图 1(d) 那样表示，称为**△连接**或**三角形连接**。

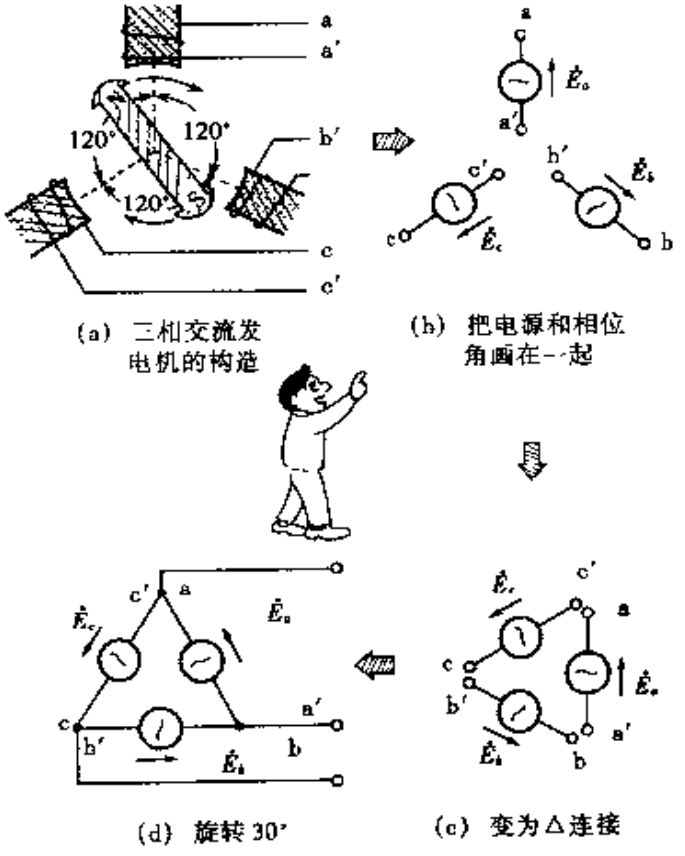



**图 1　三相电源的△连接**

这样，使用△连接，6 根线就变为 3 根，当然能高效率输电。△连接时相电压与线电压相等，但每 1 相所流过的电流，即相电流与流过输电线路的电流是不同的。下面我们将学习相电流与线电流之间的关系。

### △连接时相电流与线电流的关系

电源与负载都是△连接时称为△－△连接。

△连接时相电压与线电压是相同的，但**相电流** $\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$ 与线**电流** $\dot{I}_l$ 是不同的。其大小的关系可以像Y形连接的矢量图一样求出，即线电流是相电流的$\sqrt{3}$倍。

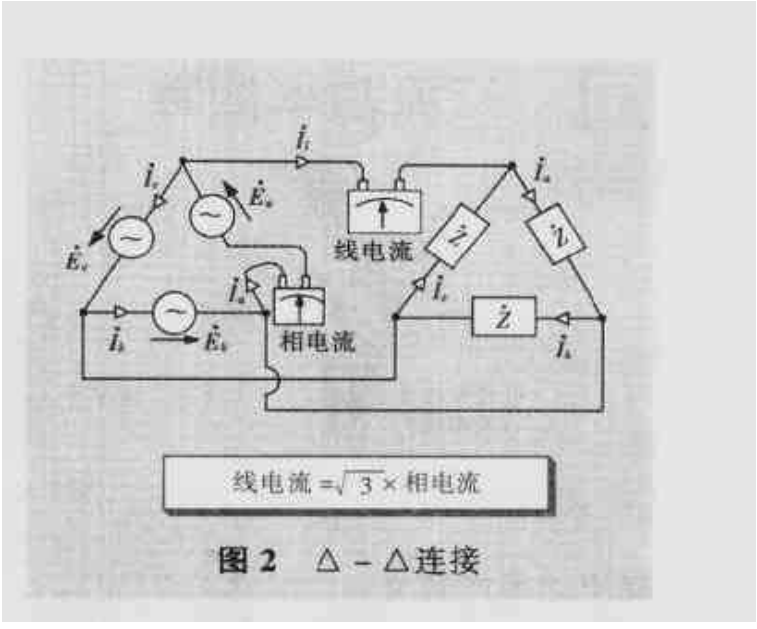



**图2　△－△连接**

为了测量△连接时的相电流与线电流，如图2所示，接上2块电流表（各相电流的相位不同，但大小相同）。



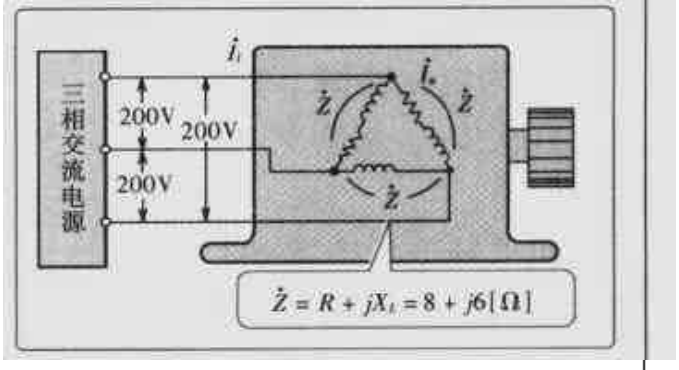

**图3　相电流的计算方法**

为了求出△连接时的相电流，如图3所示，画出1相即可，这样就使计算变得非常简单。即相电压 $\dot{E}_a$ 与负载一相的阻抗 $\dot{Z}$ 构成环路，流经环路的电流当然是相电流 $\dot{I}_a$，根据欧姆定律就可求出。其次为了求出线电流 $\dot{I}_l$，如图2所示，根据 $I_l = \sqrt{3}\, I_a$ 进行计算即可。



**Let's try　试求三相感应电动机的相电流**

试求右图所示的感应电动机的负载的相电流与线电流。




【解】　为了求出 $\dot{I}_a$ 的大小，

$$I_a = \frac{E_a}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{200}{\sqrt{64 + 36}} = 20\ [\mathrm{A}]$$

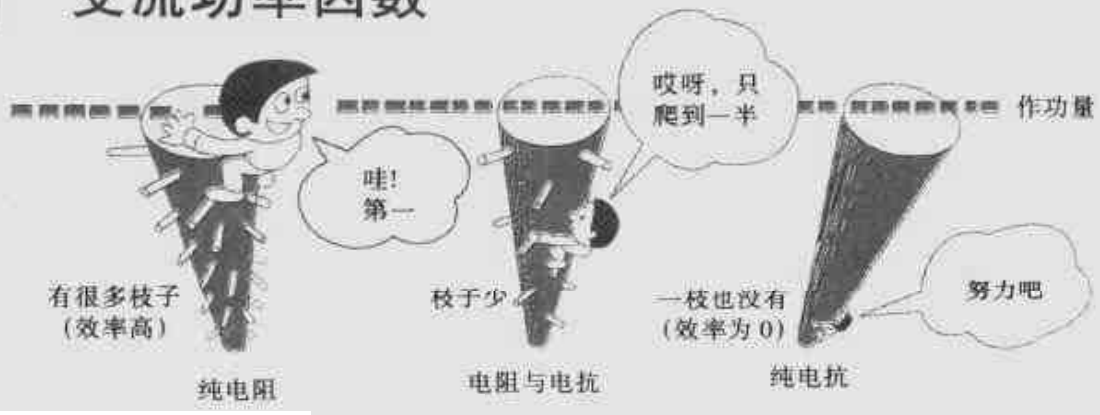
$\dot{I}_l$ 大小为

$$I_l = \sqrt{3}\, I_a = 1.73 \times 20 = 34.6\ [\mathrm{A}]$$

【答案】　相电流为20A，线电流为34.6A。

（注）在三相电路中，负载阻抗相等的三相负载称为对称三相负载，在这样的情况下，取出一相进行计算即可。

# 10 交流功率因数




## 交流功率的意义



求直流电路的功率时，可用**电压×电流**进行计算。交流电路的功率也可以用电压瞬时值×电流瞬时值求出，但此值是如图 1(b) 所示，它为瞬时值 $p$。$p$ 的平均值表示**交流功率** $P$，在纯电阻电路中可用电流与电压的**有效值** $I$ 和 $V$ 的乘积求出。一般的交流功率表达式为

$$P = VI\cos\theta\ [\mathrm{W}]$$

$VI$ 为视在功率，单位为 VA(伏安)。$\theta$ 是 $\dot{V}$ 与 $\dot{I}$ 的相位差。

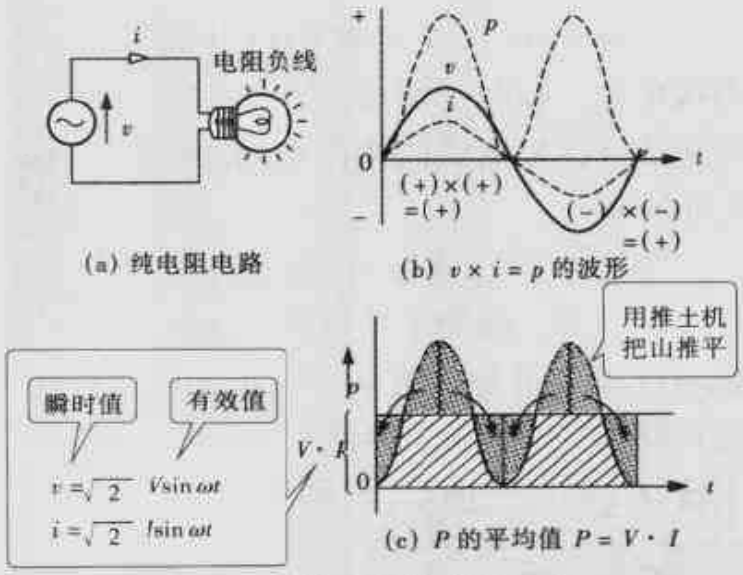



图 1　电阻电路的交流功率

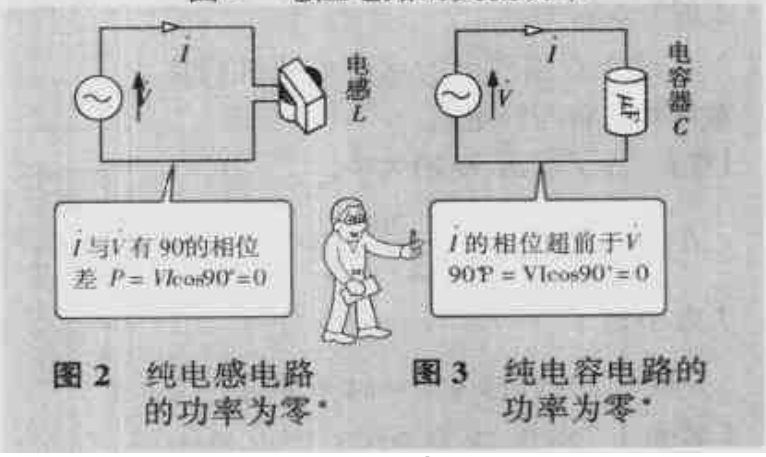



图 2　纯电感电路的功率为零*

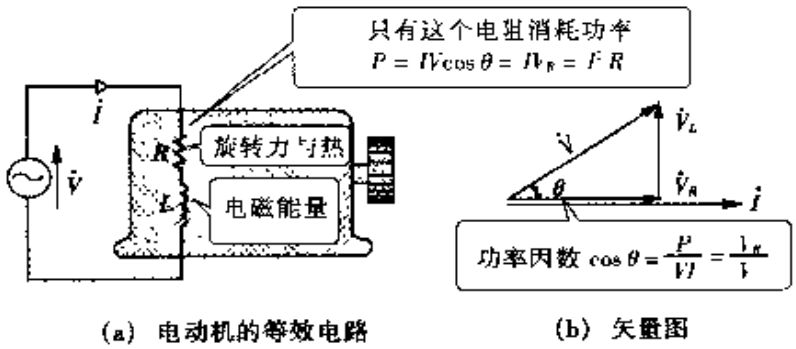
图 3　纯电容电路的功率为零*

若求纯电抗电路的功率，如图 2 所示，由电压与电流的有效值求出视在功率为 $VI$。在 $L$ 电路中，$\dot{V}$ 和 $\dot{I}$ 的相位差 $\theta$ 为 90°，即电流滞后于电压 90°。上式中 $\cos 90° = 0$，所以消耗的功率为零。

* 准确地说，有功功率为零，但无功功率不为零。——校者注



## 功率因数表示什么




(a) 电动机的等效电路　　(b) 矢量图

**图 4　电动机的功率与功率因数**

所谓功率因数 $\cos\theta$ 就是表示消耗功率(功耗)与视在功率之比。也就是说，表示电压与电流乘积 $VI$ 中有百分之几是有功功率，这就是功率因数 $\cos\theta$。

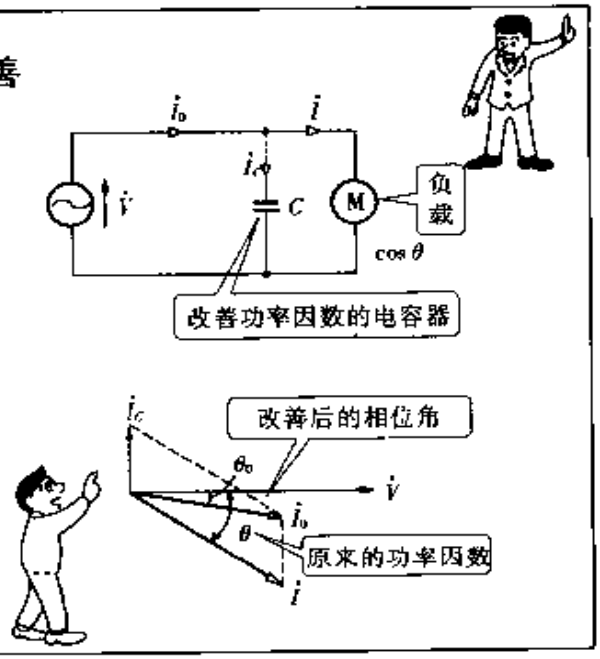
**表 1　电器的功率因数(大概数值)**

| 电器 | 功率因数 (%) |
|---|---|
| 电风扇 | 80 ~ 90 |
| 电灯 | 100 |
| 面包烤炉 | 100 |
| 电饭煲 | 100 |
| 日光灯 | 70 |
| 收音机、电视机 | 90 ~ 100 |

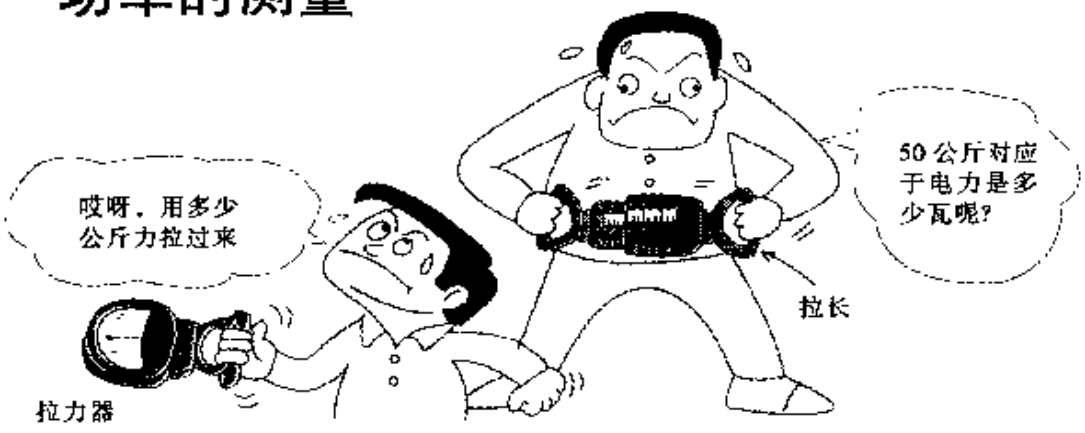
功率因数为 0% ~ 100% (0 ~ 1)，在纯电阻电路中，$\theta$ 为 0°，因此，$\cos\theta = 1$，即为 100%。在图 2 和图 3 所示的仅有 $L$ 和 $C$ 的电路中，$\cos\theta = 0$。图 4 示出电动机的等效电路，它是感抗与电阻串联。求功率因数时，由图 4(b)的矢量图可知，$\cos\theta$ 用电阻电压相对于电源电压的比例来表示。电动机的负载若增大，电阻值就增大，功率因数 $\cos\theta$ 值接近于 1。表 1 所示的电风扇功率因数为 80% ~ 90%，表明可根据风的强弱来改变功率因数。日光灯的功率因数很低，这是因为日光灯串联了镇流器(线圈)的缘故。

### 功率因数的改善

即使有电流流通也不消耗功率，人们认为这样可以获得巨大效益，但实际上由于没有作功，也就谈不上获得效益。从输电的观点来看，流有无功电流需要较大容量输电设备。因此，对功率因数很差(80% 以下)的负载来说，可以并联一个数值相近，但作用与感抗相反的电容，力图改善功率因数。



# 11 功率的测量




## 功率的单位

电的作功能力称为**功率**，用瓦(W)、千瓦(kW)、兆瓦(MW，1兆瓦等于$10^6$瓦，表示发电厂等的大功率时使用的单位)来表示。

$1\ [\mathrm{kW}] = 102\ [\mathrm{kgf \cdot m/s}] = 1.34\ [\mathrm{PS}]$

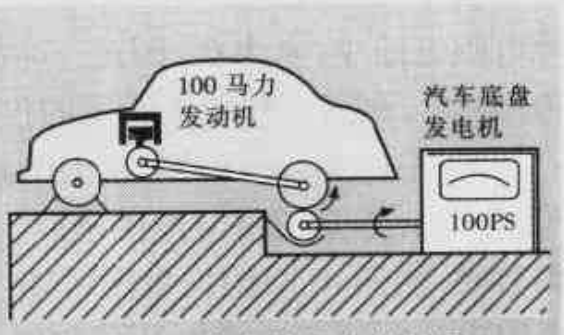



图1 汽车的马力的测量

## 交流功率的测量

若求图2的视在功率 $VI$，则有

$VI = 100 \times 0.9 = 90\ [\mathrm{VA}]$

消耗功率 $P$ 为81[W]，电视机的功率因数 $\cos\theta$ 为:

$$\cos\theta = \frac{P}{VI} = \frac{81}{90} = 0.9$$

即90%。

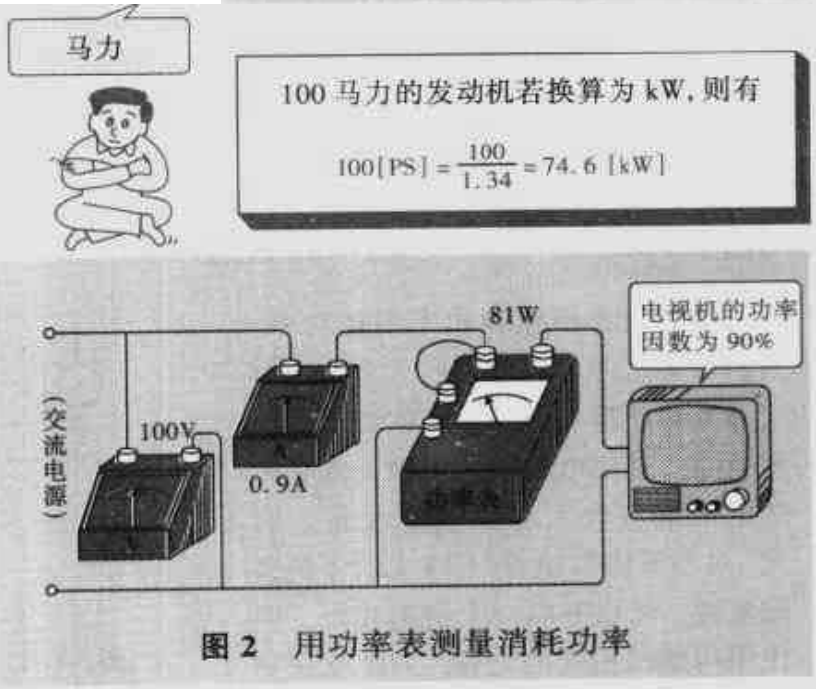



图2 用功率表测量消耗功率

这样，若用电压表和电流表测量现在功率，用功率表测量消耗功率，则根据计算就可求出功率因数。用测量仪器来测量功率因数时，可使用形状类似于功率表的功率**因数表**。

## 功率表的内部结构

为求出功率，要用电压与电流以及功率因数相乘，因此，设法使这种关系成立的装置就是**功率表**。

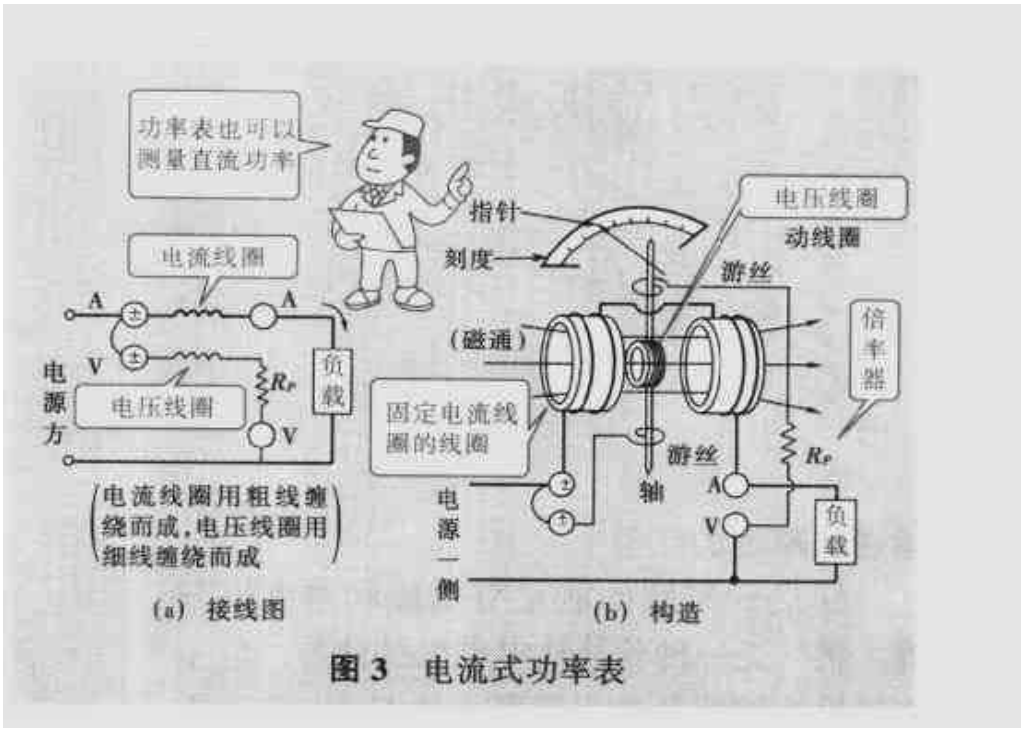


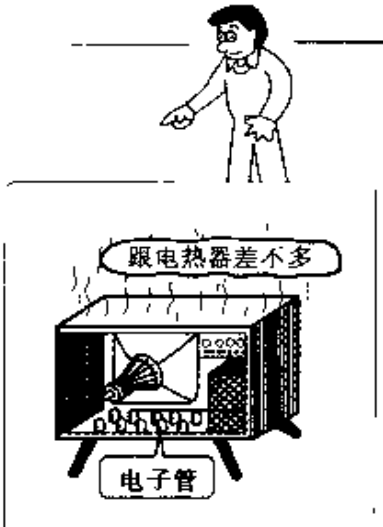

图 3　电流式功率表

图 3(b) 示出了功率表的内部结构，负载电流流过左右两侧的电流线圈，产生与电流成正比的磁场。磁场中有个可动的电压线圈。这个线圈上施加与负载电压相同的电压，在倍率器中流过被限制的电流。这个电流与电流线圈的磁场产生使电压线圈转动的力，力的方向按弗莱明左手定则确定，指针偏转，转到与游丝力平衡处止住。在功率因数较低(有相位差)的场合，电压线圈的驱动力矩很弱，指针偏转角不大。

(电流式功率表的电流线圈与交流电流表相同，有 ± 端子和 A 端子，电源一侧接 ± 端子，与负载串联连接。电压线圈有 ± 端子和 V 端子，若不按图 3(a)所示那样连接，指针会反向偏转，请务必注意此点。)

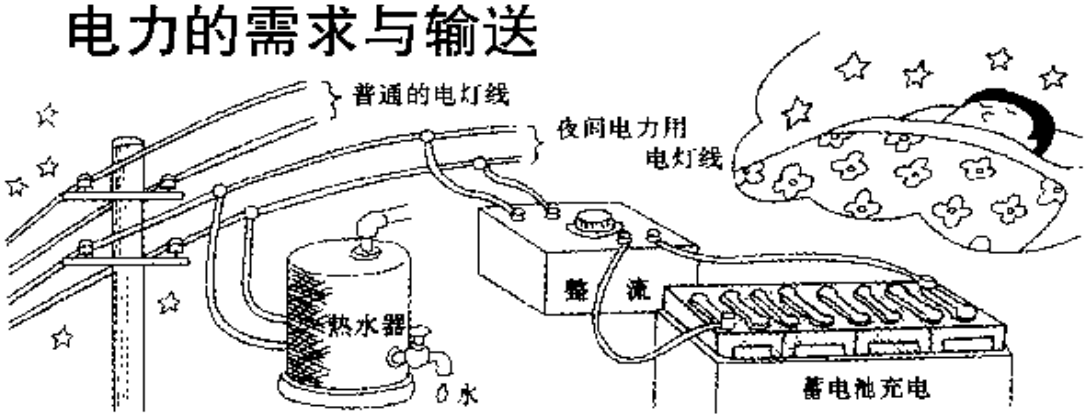
### Let's try　向节能化发展的彩色电视机

过去的电子管式彩色电视机因发热而消耗功率大，其后，电视机晶体管化，功率降到一半以下，现在，由于集成电路化，电路的元器件大幅度减少，18 英寸(1 英寸≈2.54 厘米。下同)电视机的功耗也只相当于 1 个灯泡的功耗。而且采用无预热灯丝的不耗电的显像管的电视机也已制造出来。最近的小型电视机还采用了几乎不耗电的液晶显示器。




电子管式彩色电视机

# 12 电力的需求与输送




**输送到家庭的能量**

输送到家庭的能量有电能和城市燃气等，燃气是一种价格比电能低的热源，但不能转换为照明及动力等形式的能量。在这方面来说，电能是用一个开关就能转换为其它形式的能量，转换效率也非常高，因此，电能是一种使用方便的能量(图 1)。

现在，在日本消耗的总能量的 40% 是电能，其中 20% 的电能是家庭等使用的。

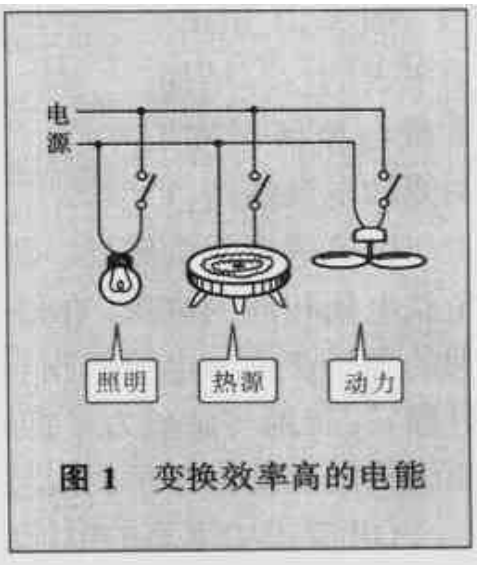



图 1　变换效率高的电能

**白天的用电高峰和夏季的用电高峰**

以前，冬季是一年中消耗电力最多的季节，但现在由于空调设备的普及，夏季也成了用电高峰(参见图 2)。

图 3 所描绘的是一天内电力（负荷）变化的曲线图，称为日负荷曲线。清晨以前电力消耗处于最大功耗一半以下的状态，人们活动一开始，需要电力就逐渐增加，在下午需要最大电力，这称为**负荷高峰**，为要适应这种需要，电力公司就必须增加**供电设备**。

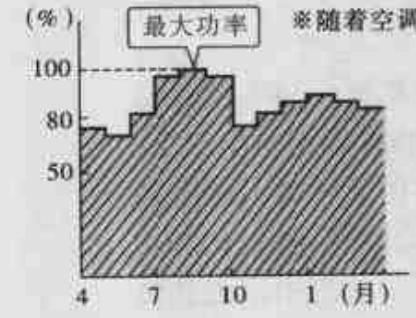



图 2　不同月份消耗的最大电功率的演变

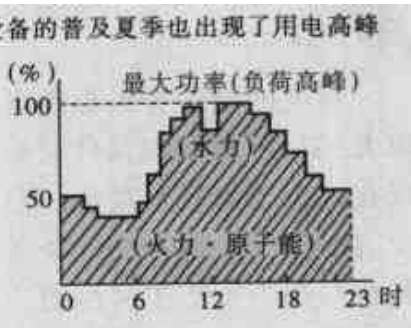



图 3　夏季最热时日消耗电功率的演变(日负荷曲线)



负荷高峰时发电机全部运行，其它时间一部分发电机停止运行，应与需求的电力相一致，但火力发电厂不能熄灭锅炉中的火，若轻负荷运行，则发电机的效率下降，也浪费了石油。所以，电力公司当然希望负荷高峰不要急剧增大，这样，可以在需求电力的变动不致增大的条件下进行供电。

## 电力的输送

输电线路称为输电线，若距离长，输电线的电阻就不能忽略不计。若输电线的电阻为 $R$，就会产生 $I^2R$ 的焦耳热，变成了输电损耗。

经济输电应减少以平方关系产生影响的电流，当然采用图 4 下方所示电线那样的高压输电最好。

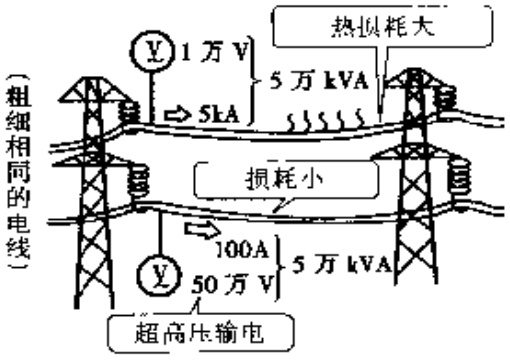



**图 4　输电线路的电压与损耗之间的关系**




试实际计算图 4 的输电线路的热损耗。电线采用截面积为 1.6cm² 的铜线，按 1km 计算（铜的电阻率 $\rho = 1.6 \times 10^{-8}\ \Omega m$）。

（导体的电阻）　$R = \rho \dfrac{l}{S} = 1.6 \times 10^{-8} \times \dfrac{10^3}{1.6 \times 10^{-4}} = 0.1\ [\Omega]$

在 1 万 V、5kA 的场合，$P_1 = I_1^2 R = 25 \times 10^6 \times 0.1 = 2500\ [kW]$

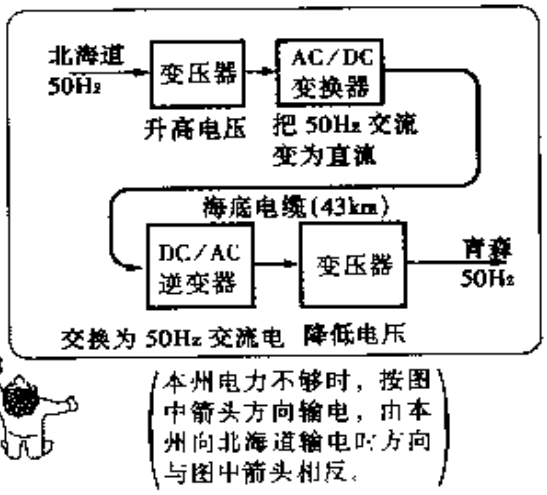
在 50 万 V、100A 的场合，$P_2 = I_2^2 R = 10^4 \times 0.1 = 1\ [kW]$

即 5kA 的场合每 1km 输电线路损耗 2 500kW 的电力。

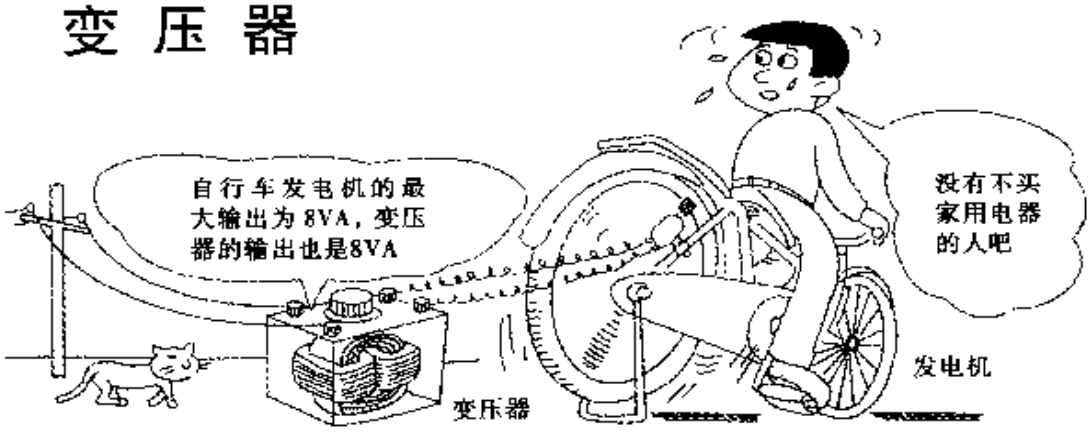



### 改为直流输电

说到电力输送，在日本几乎都采用交流输电。然而，现在已有**直流输电**，这是由于半导体的交直流变换技术的发展得到可靠保证，如右图所示那样，日本的北海道与本州之间就连有海底电缆进行输电。



# 13 变压器




## 变压器的原理

若次级线圈切割流经初级线圈电流产生的磁通，就产生感应电动势。利用此原理的是**变压器**。如图 1 所示，若初级线圈中流经交流电流，就产生交变磁通，次级线圈中就产生感应电动势。

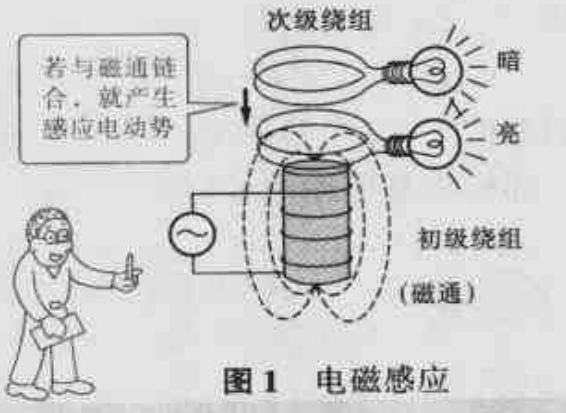



图 1　电磁感应

对于图 2 所示的**理想变压器**，认为采用的铁芯是**强磁性体**，并且无损耗(铁损与铜损)，所谓强磁性体就是流经初级线圈的电流所产生的磁通全部跟次级线圈链合。

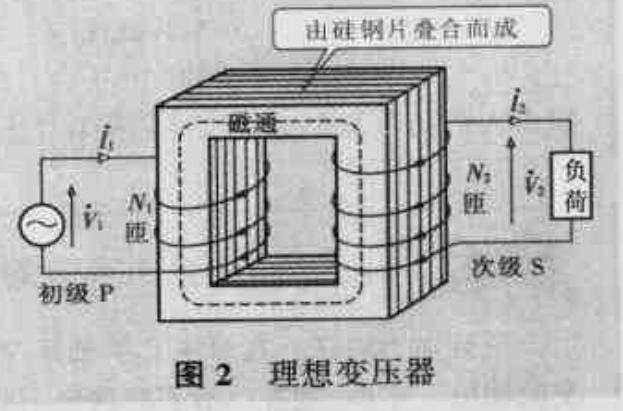



图 2　理想变压器

对于这样的变压器，以下关系式成立(参见图 3)：

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{N_1}{N_2}\quad\left(\begin{array}{l}\text{电压与线圈匝数}\\\text{成正比}\end{array}\right)$$

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}\quad\left(\begin{array}{l}\text{电流与线圈匝数}\\\text{成反比}\end{array}\right)$$

$$V_1I_1=V_2I_2\quad\left(\begin{array}{l}V_1I_1,\ V_2I_2\text{ 表示变}\\\text{压器的容量}\end{array}\right)$$

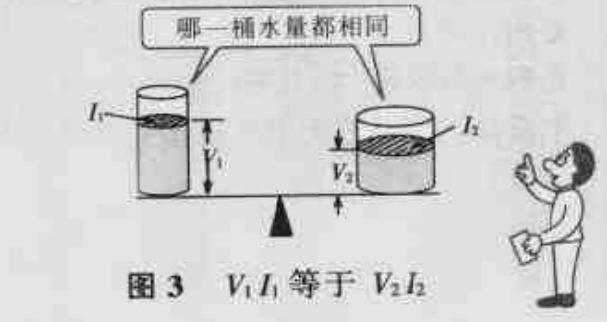



图 3　$V_1I_1$ 等于 $V_2I_2$

## 变压器的损耗

实际的变压器从初级到次级进行变压，在传递功率过程中有百分之几的**损耗**。为了降低损耗（变压器发热量），铁芯采用**硅钢片叠合**而成。

绕组电阻引起的损耗受负载电流变大的影响，这种损耗也称为**铜损**，但可采用尽量粗的铜线来减少这种损耗（参见图 4）。

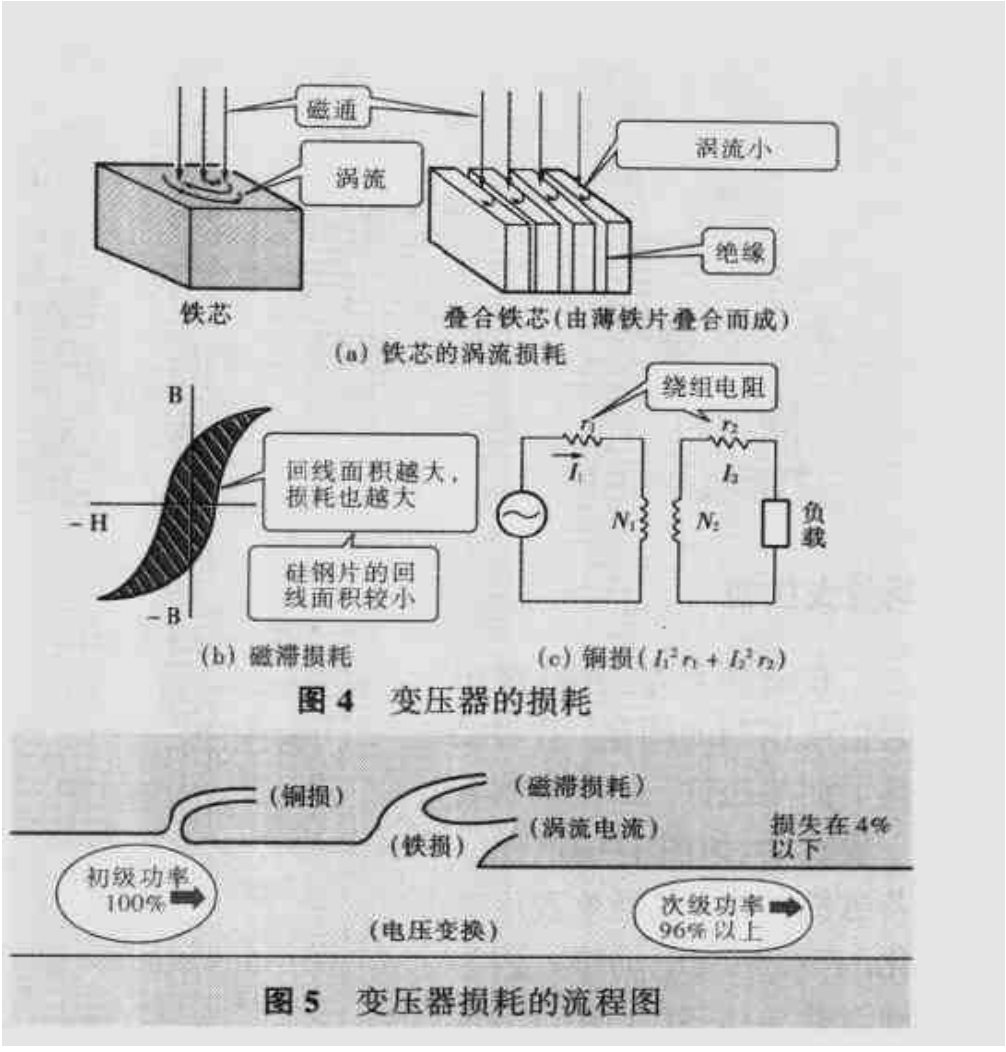



**图 4** 变压器的损耗




**图 5** 变压器损耗的流程图

如图 5 所示，从变压器的初级绕组输入的功率由次级绕组输出，有百分之几的损耗。变压器容量越大其变换效率越高。




### 试进行以下的计算

对于初级绕组 $N_1 = 1500$，次级绕组 $N_2 = 50$ 的变压器，若在初级施加电压 $V_1 = 6000$[V]，问次级电压是多少伏？若初级电流 $I_1 = 5$[A]，问次级电流是多少安？

【解】

由 $\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$，则有 $V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 = \frac{50}{1\,500} \times 6\,000 = 200$ [A]

由 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$，则有 $I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{1\,500}{50} \times 5 = 150$ [A]



# 14 旋转磁场




## 阿拉戈圆盘

在磁铁上方，用线绳吊起铝或铜制的圆盘，若转动其下面的磁铁，圆盘也跟着一块转动。如图 1(b)所示。若磁铁转动，磁通就发生变化，产生感应电动势。因为圆盘是导体，就如图 1(c)那样在感应电动势附近产生**涡流**。涡流与磁铁间产生力，也就是使圆盘转动的力，其方向由弗莱明左手定则确定，如图 1(d) 所示，圆盘与磁铁同方向转动。

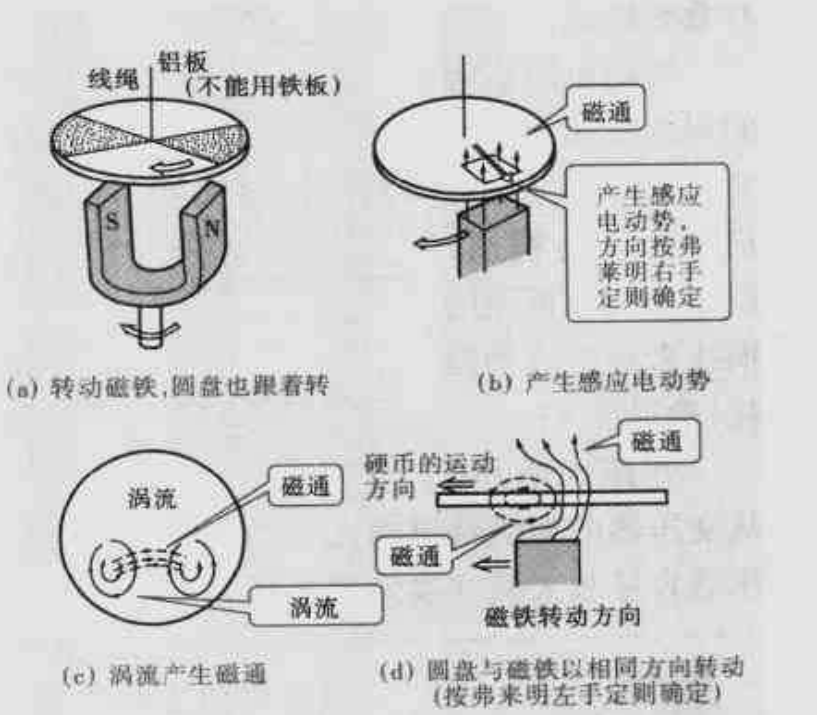
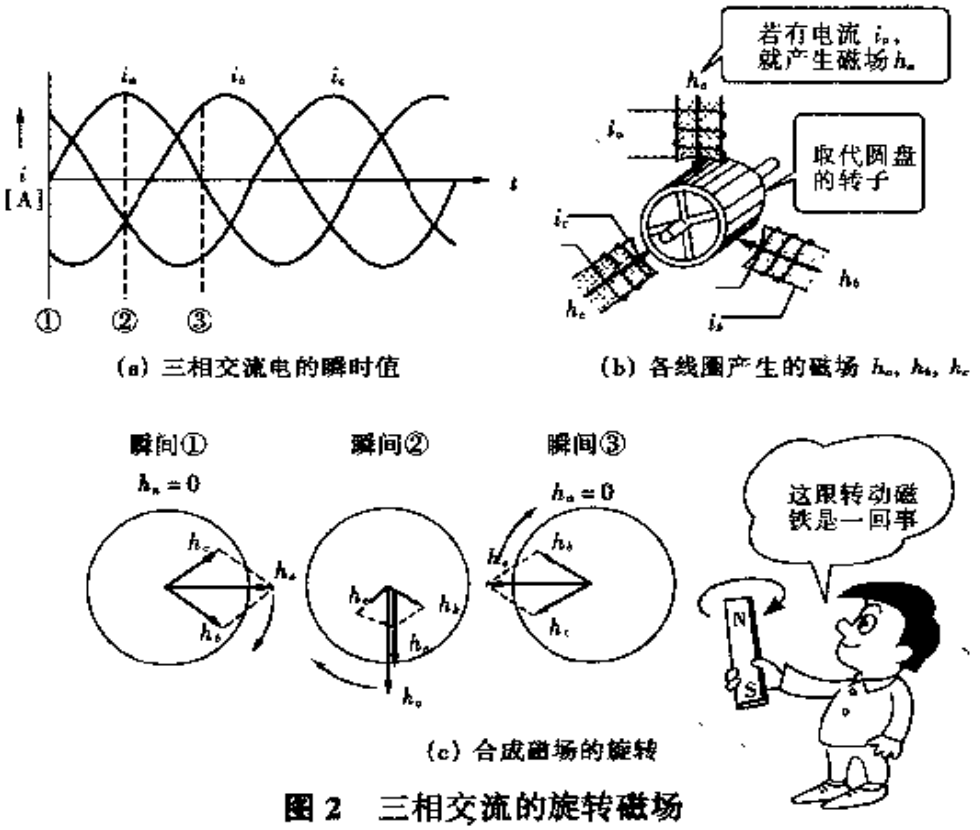



图 1　阿拉戈圆盘

## 用电磁铁使圆盘转动

用电磁铁代替永久磁铁能否使圆盘转动呢？三个线圈各自错开 120°配置，若在这些线圈上施加三相交流电压，能产生什么样的磁场呢？分析一下图 2(a) 所示三相交流电流①的瞬时磁场，在瞬间①，因 $i_a=0$，所以 $h_a$ 为 0；因 $i_b$ 为负，所以图 2(b) 中 $h_b$ 反向；因 $i_c$ 为正，所以图 2(b) 的 $h_c$ 为正方向。$h_a$ 和 $h_c$ 的**合成磁场** $h_0$ 变成如图 2(c)所示的①那样。图 2(a)的瞬间

②的合成磁场 $h_0$ 转到最下面，在瞬间③转到左面。这样，随着时间转动的合成磁场称为**旋转磁场**。利用这个原理的是三相感应电动机。




(a) 三相交流电的瞬时值　(b) 各线圈产生的磁场 $h_a$, $h_b$, $h_c$

(c) 合成磁场的旋转

**图 2　三相交流的旋转磁场**

图 2(b)示出了三相感应电动机的工作原理，转子采用铝或铜制成。若将三相交流产生的旋转磁场施加于转子，就像圆盘跟着永久磁铁那样转动。感应电动机的转速 $N$ 由产生旋转磁场的磁极对数 $p$ 与三相交流电压的频率 $f$ 决定。图 2(b)所示的极对数是产生旋转磁场的最小单位，因此为 1。若 $f=50[\mathrm{Hz}]$，则转速为

$$N_s=\frac{60f}{p}=\frac{60\times 50}{1}=3000\ [\mathrm{r/min}]$$

每分钟的转数

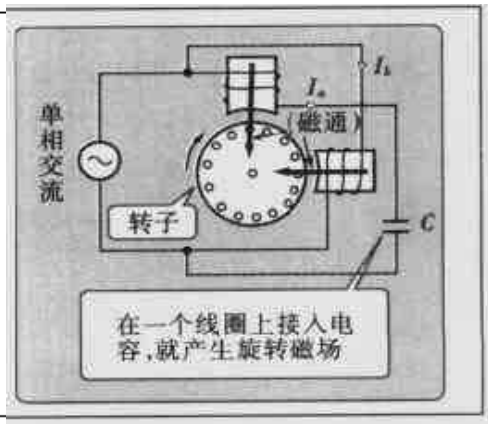


即电动机的转速是由频率的高低所决定，因此，称为**同步转速**。

Let's try

### 各种单相交流电动机

家用交流电动机的构造因用途而异，榨汁机或吸尘器那样高速旋转的设备要使用**整流子电动机**。廉价的唱机等使用**罩极感应电动机**，而电风扇，洗衣机等则使用如右图所示的**电容式电动机**。





# 本章小结



**1.** 像进行准确的复数计算那样，试计算以下问题。

❶ $4 - j3 - 7 + j6 \quad = (\quad) + j(\quad)$

❶ $(5 + j2)(3 + j\ ) = (\quad) + j(\quad)$

❶ $-(7 + j9)j \quad = (\quad) - j(\quad)$

❶ $(6 + j2)j^2 \quad = (\quad) - j(\quad)$



**2.** 试用极坐标表示并计算图示的 *RC* 串联电路的电流。

【解】

$$\dot{Z} = R - j(\quad)$$

$$= 4 - j(\quad)$$

$$= \sqrt{4^2 + 3^2}\angle\theta$$

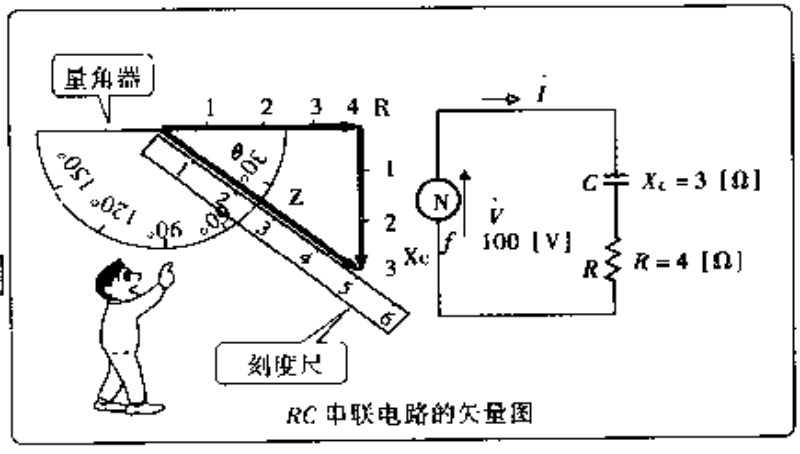
（大小）（方向）

用量角器测量

$$= 5\angle -37^\circ$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{100\angle 0^\circ}{5\angle -37^\circ}$$

$$= (\quad)\angle +37^\circ$$




*RC* 串联电路的矢量图

**3.** 在功率因数为 80% 的阻抗上施加 100V 的交流电压时，流过的电流为 6A。试计算消耗的功率。

$$P = VI(\quad)$$

$$= 100 \times 6 \times (\quad)$$

$$= (\quad)\ [\mathrm{W}]$$



答案

1. (a) $(-3) + j(3)$
   (b) $(13) + j(11)$
   (c) $(9) - j(7)$
   (d) $(-6) - j(2)$

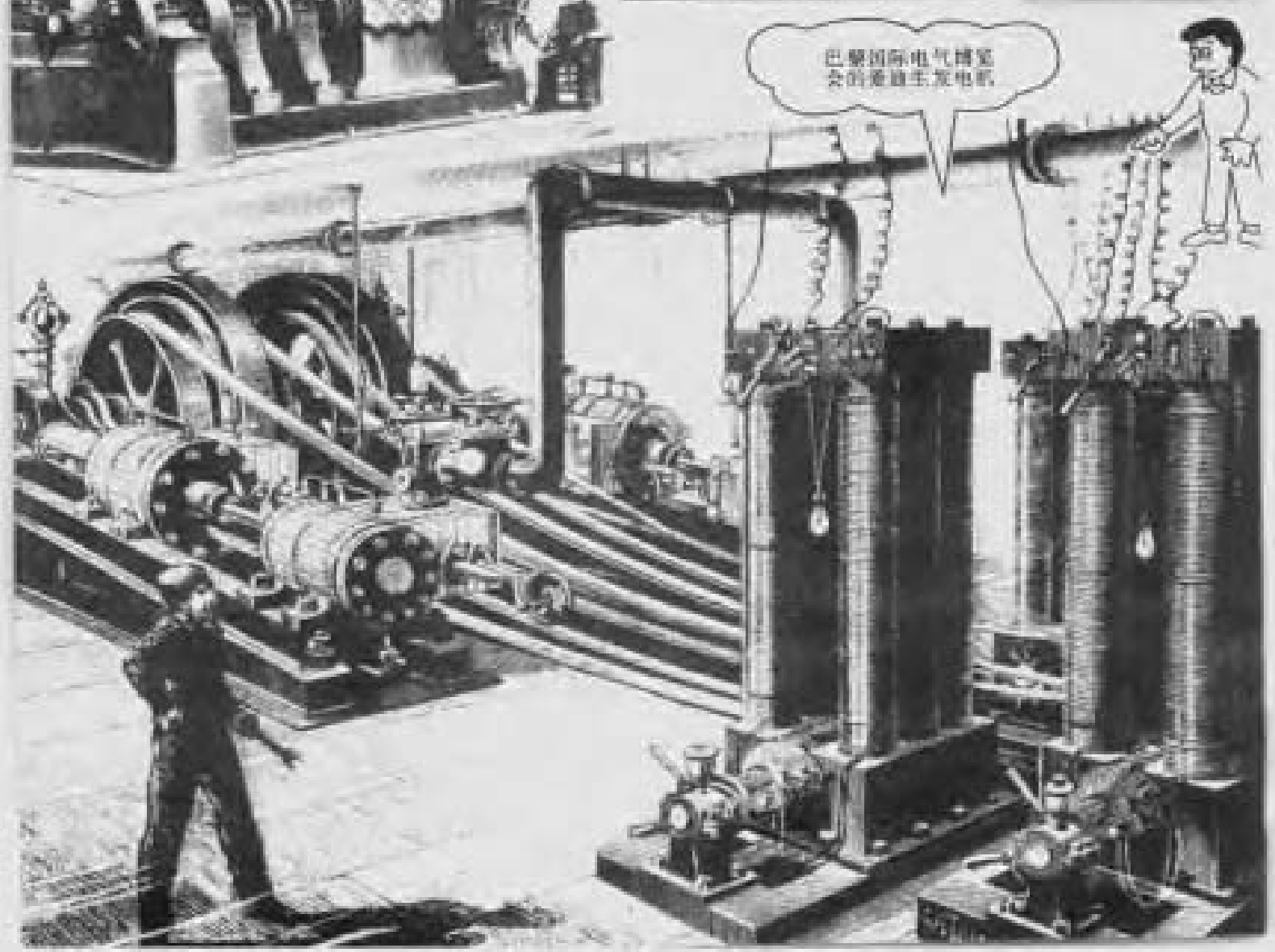
2. $\dot{Z} = R - j(Xc)$
   $= 4 - j(3)$
   $\dot{I} = (20)\angle 37^\circ$

3. $P = VI\cos\theta$
   $= 100 \times 6 \times 0.8$
   $= 480\ [\mathrm{W}]$

# 7 电量的测量





# 本章要点及学习方法

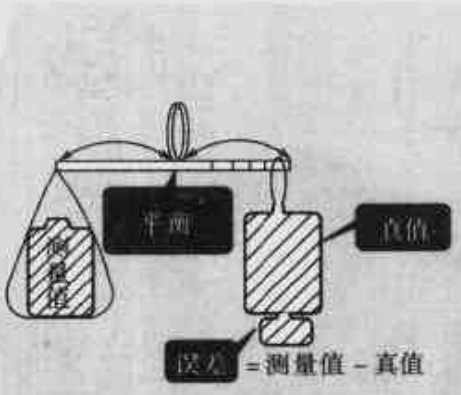


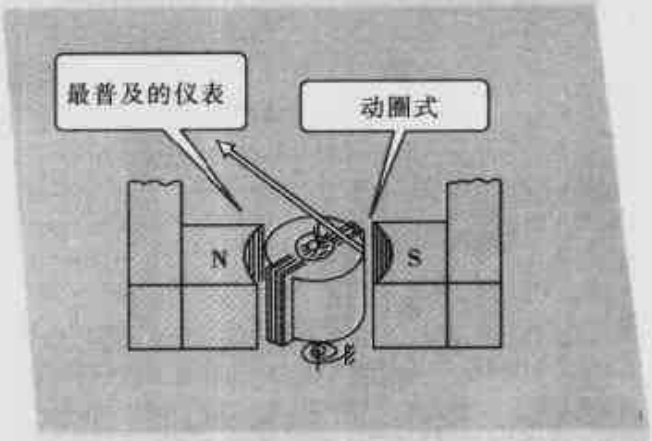

不同的机械装置，其样式与形状也不相同，这些都是看得见摸得着的。但对于电量来说，用眼睛不能直接观察到，因而需要变换为用测量仪表通过视觉能观察到的形式。用测量仪表对电量进行测量称为**电量测量**，温度、应变、压力等的测量称为**应用测量**。

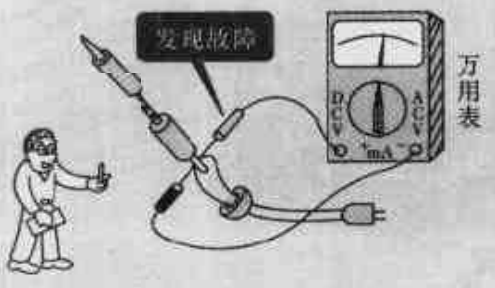
这是一般的测量，但测量中必有误差。本章将要学习电量测量中的误差。

从古至今，电量测量的历史悠久，现今最常用的**指示仪表**是**动圈式仪表**。它是测量直流的仪表，稍加改进也能成为测量交流或高频等的多用途仪表。其工作原理要弄明白。其次是万用表，虽不适用于精密测量，但用这种表可进行各种电量的测量。在检查电路故障等场合它也是最方便的仪





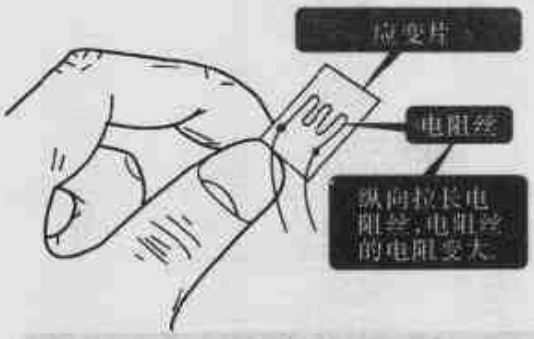



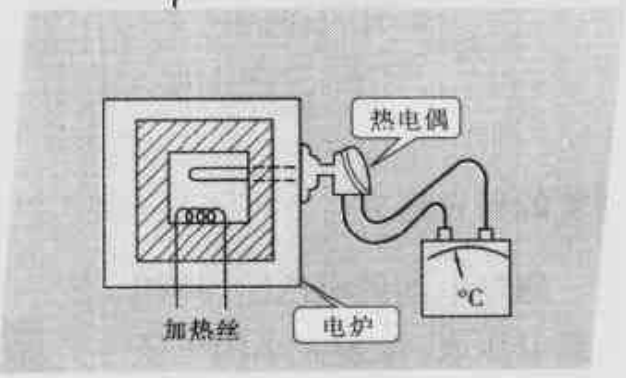



表，因此，务必学会熟练使用。

还要学习作为电测法应用的应变、速度、温度、放射线等的测量方法。需要能把光、热、应变等物理量或化学量转换为电量的**传感器**。使用传感器的测量就是应用测量。在自动化不断发展的现代社会，采用传感器的测量技术与信息技术相融合，不断推进无人化、自动化的发展。

本章学习电量测量和应用测量的基本知识。




## 本章要学习的内容

**<直流测量仪表>**

学习灵敏度与精度都很高的动圈式测量仪表的工作原理，学习如何使用电流表和万用表。

**<交流测量仪表>**

工频及高频用测量仪表有哪些特征。直接测量高电压与大电流时需要的变换器与变压器有哪些不同。




**<电阻的测量>**

被纳入万用表中的直读式电阻表是什么样的电路？测量接地电阻要用交流电源，是什么样的测量仪表？如何进行测量？

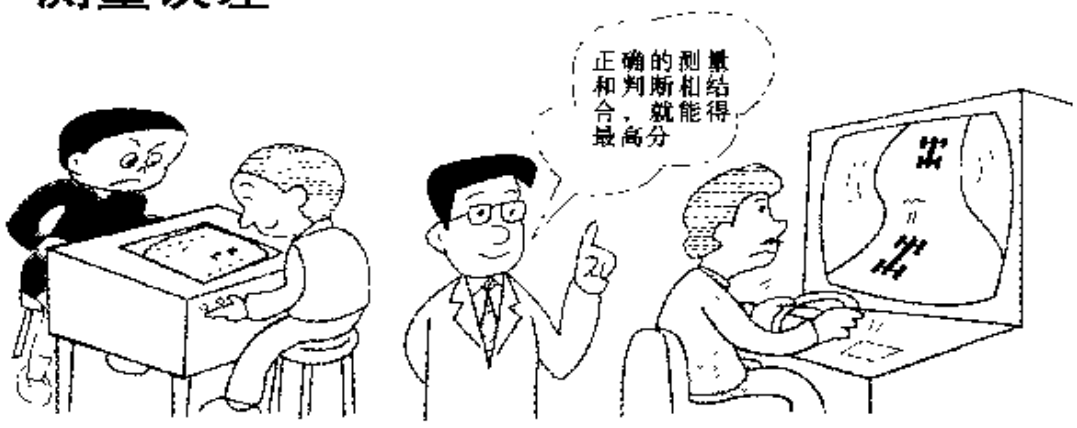


**<应用测量>**

学习检测失真、速度、温度、放射线等物理量的传感器，以及其测量方法等有关知识。另外，还要研究为实现集中管理而采用的遥测法等有关知识。



# 1 测量误差




## 误差的各种形式

测量电池的电压时，使用直流电压表，**误差**大小因电压表的**精度**等级(class)而异。

除了**测量仪表的误差**以外，若不能正确地进行测量也会产生误差。如图 1 所示那样，标有水平放置标记(—)的测量仪表，在测量时若垂直放置或不进行调零都会产生误差，这样的误差叫做**系统误差**。

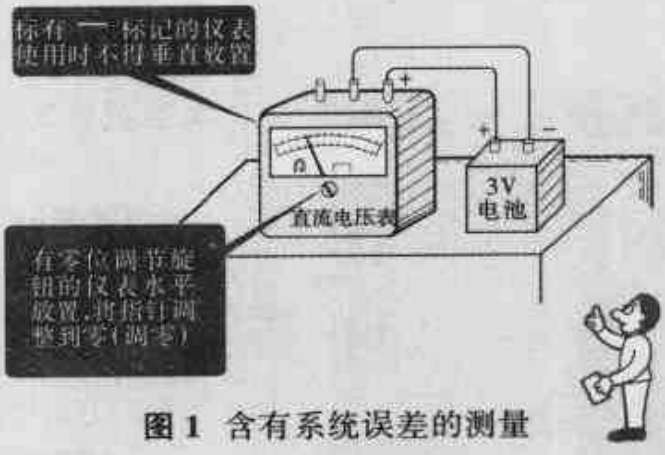



图 1 含有系统误差的测量

下面分析由于读取方法不当引起的误差，对于图 2(a)所示情况，上下刻度读错，或者使用量程不对都会引起误差。图(b)的情况下，读数时眼睛的位置不是位于指针的正上方也会引起误差。这是测量者注意力不集中等引起的误差。

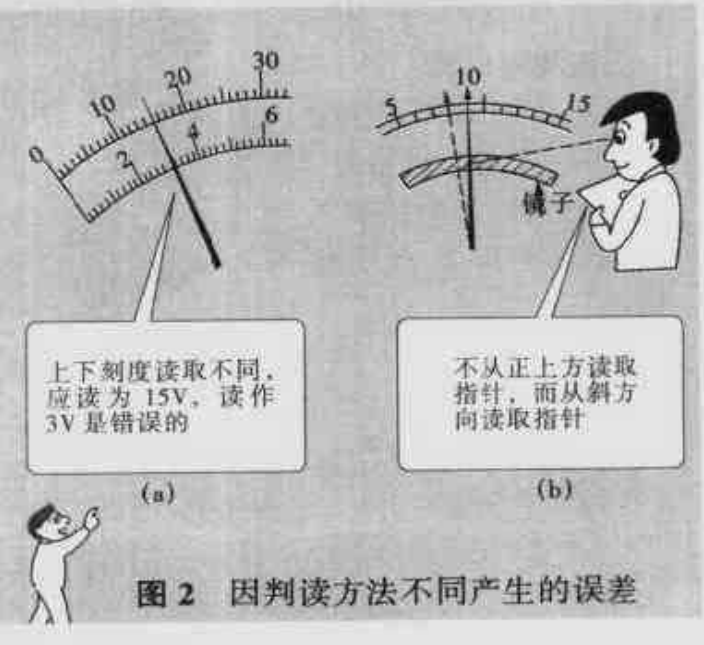



图 2 因判读方法不同产生的误差

## 误差的表示方法

用测量仪表测得的值叫做**测量值**，其正确值或额定值叫做**真值**。为表示测量值 $M$ 与真值 $T$ 之间的误差的相对程度是多少，用**相对误差**或**误差百分数**来表示：

$$\text{误差百分数} = \frac{\text{误差}}{\text{真值}} \times 100 = \frac{M-T}{T} \times 100\ [\%]$$

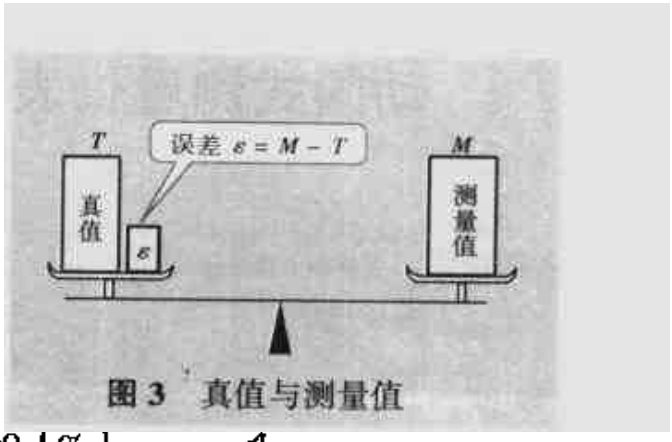


图 3　真值与测量值



根据误差的大小，测量仪表分为以下几个等级，即 0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级等，其误差，例如 0.5 级的测量仪表，含有最大刻度的 ±0.5% 以内的误差(也叫做允许误差)。测量时若指针的偏转量达不到测量仪表满刻度的一半，则测量误差较大，因此，在选择测量仪表的量程时，应使指针能偏转到满刻度附近。

表 1　电气测量仪表的种类

| 等级 | 允许误差(%) | 主要用途 |
|---|---|---|
| 0.2 级 | ±0.2 | 副标准仪表用 |
| 0.5 级 | ±0.5 | 精密测量用 |
| 1.0 级 | ±1.0 | 大型配电盘用 |
| 2.5 级 | ±2.5 | 一般配电盘用 |

One point

0.5 级的电流表指示为 6A，电流的有效测量范围为

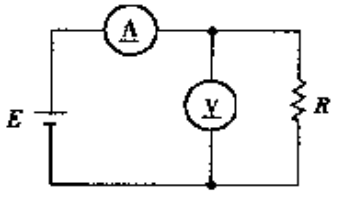
$0.995 \times 6 = 5.97\ [\text{A}] \sim 1.005 \times 6 = 6.03\ [\text{A}]$



Let's try

### 有效数字的处理

如右图所示，在根据电压表和电流表的读数来求出电阻的情况下，试研究测量仪表的有效数字与电阻的计算位数之间的关系。

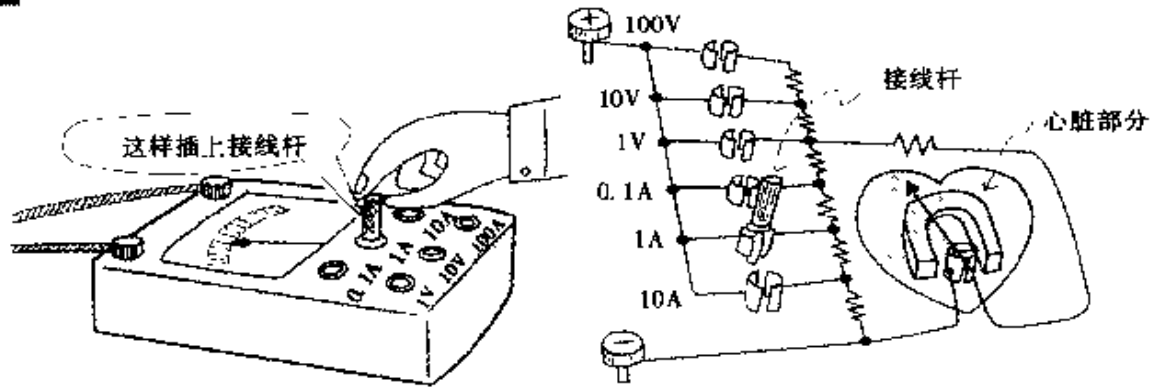


根据电压表与电流表的测量值计算电阻

测量仪表为 2.5 级，若根据 $V = 31$[V]、$I = 0.82$[A]（测量仪表的有效数字为 2 位）来计算电阻，则 $R = 37.8048\ldots$

因为测量仪表的第 2 位含有误差，所以，对电阻的第 3 位进行四舍五入，即为 $R = 38[\Omega]$。采用 0.5 级仪表进行测量时，根据 $V = 31.0$[V]，$I = 0.823$[A] 计算出 $R = 37.667\ldots$ 因为测量仪表的第 3 位含有误差，对电阻的第 4 位进行四舍五入，即为 $R = 37.7[\Omega]$。

## 2 动圈式测量仪表




### 要经常看看刻度盘上的符号

要注意仪表刻度盘上用小字表示的符号：

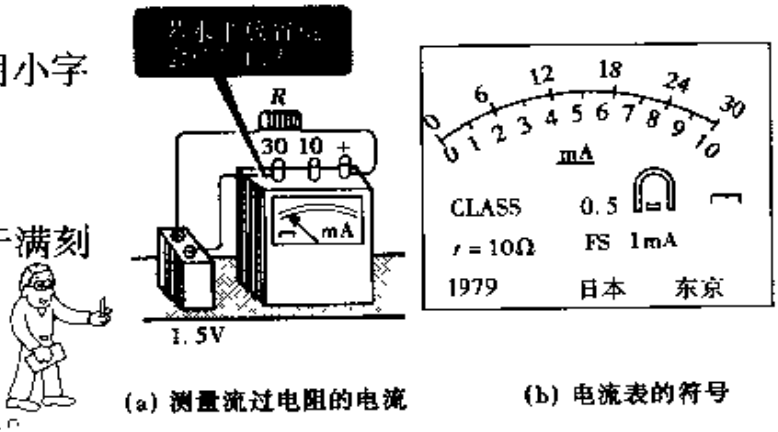
mA: 直流毫安表。

CLASS 0.5: 含有相当于满刻度的 ±0.5% 的误差。

: 动圈式测量仪表。

: 使用时需水平放置。

图 1(a) 所示的电表接的是 30mA 端子，使用时要注意刻度盘。



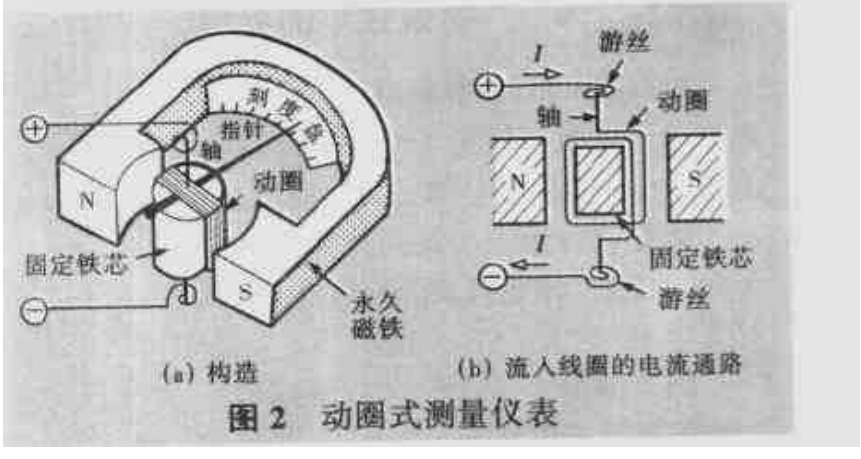

(a) 测量流过电阻的电流　　(b) 电流表的符号

图 1　动圈式电流表

### 研究一下动圈式仪表的构造

**指针式测量**仪表中最广泛使用的是动圈式测量仪表(图 2)。

这种类型的测量仪表，是在永久磁铁的中心部位安置一个固定铁芯，铁芯上缠绕着可动线圈。永久磁铁和铁芯之间分布着均匀磁场，若测量电流 $i$ 从线圈中流过，就产生驱动力矩 $\tau_D$，使指针偏转。固定在轴上的游丝的控制力矩 $\tau_C$ 与转角 $\theta$ 成正比。游丝的控制




(a) 构造　　(b) 流入线圈的电流通路

图 2　动圈式测量仪表

力矩与线圈的驱动力矩相平衡时，指针就停止不动。

（驱动力矩）$\tau_D = k_1 i$ （常数×测量电流）

（控制力矩）$\tau_C = k_2 \theta$ （常数×转角）



这里 $\tau_D = \tau_C$，所以 $\theta = (k_1 / k_2)\, i = ki$。

也就是说，若测量电流增大，则偏转角按比例增大，这种测量仪表采用均匀刻度。

## 多量程的电压表和电流表

准备 1 台如图 2 所示的动圈式电流表，如图 3(a) 所示，若该电流表跟一个电阻(倍率器)串联，就构成一块多量程直流电压表。如图 3(b)所示，若该电流表跟一个小电阻(分流器)并联，就构成一块多量程直流电流表。

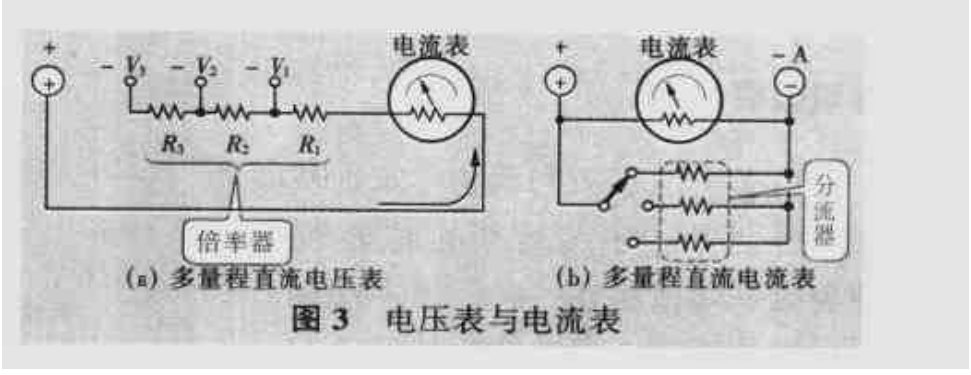
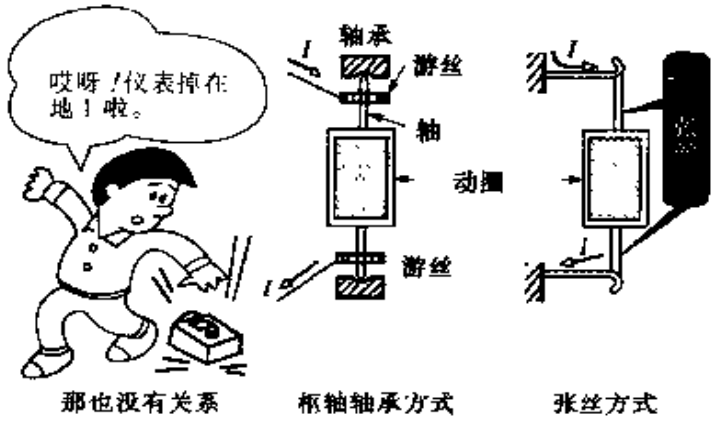



图 3　电压表与电流表



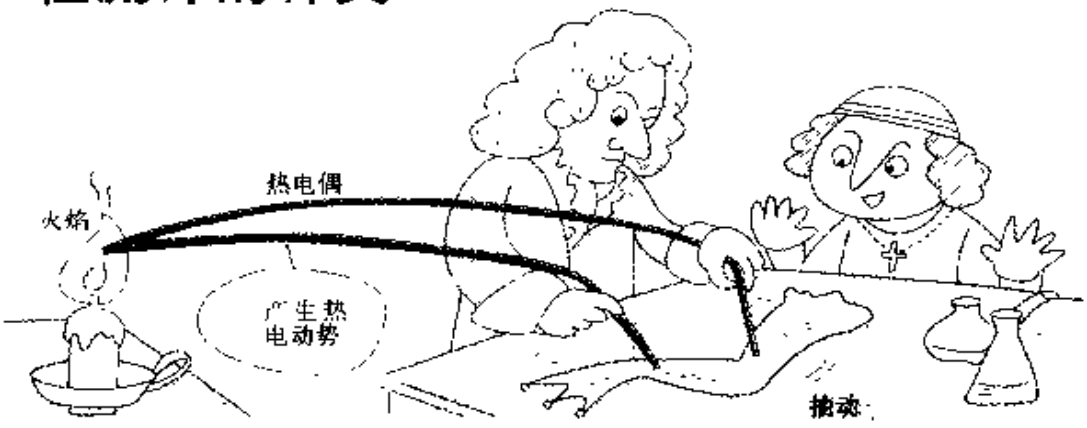
### 枢轴轴承和张丝轴承

若向使用枢轴轴承的仪表施加一个冲击，轴的尖端就会折断，脱离轴承。张丝式仪表是用磷青铜的丝带状电线来悬吊可动线圈，因此，既使承受较强的冲击也不会损坏。另外，不像枢轴轴承方式那样有机械摩擦部分，可构成误差小的仪表。由于张丝方式具有这些特性，因此，高级动圈式仪表几乎都采用这种方式。




[注]张丝轴承的“张丝”和“丝带”都是商品名称。

# 3 检流计的种类




## 感知微弱电流

1780 年，意大利动物学家加伐尼在解剖青蛙时，发现新的现象。两种金属一端接触在一起，另一端触到青蛙的腿时，青蛙的腿就抽动起来。这与后来的伏打电池的发明有关，是个重大发现。英语的 galvanize（在 .... 中流通电流）就是因加伐尼而得名，**检流计**叫做 **galvano** 电流计（galvanometer），用符号Ⓖ来表示。

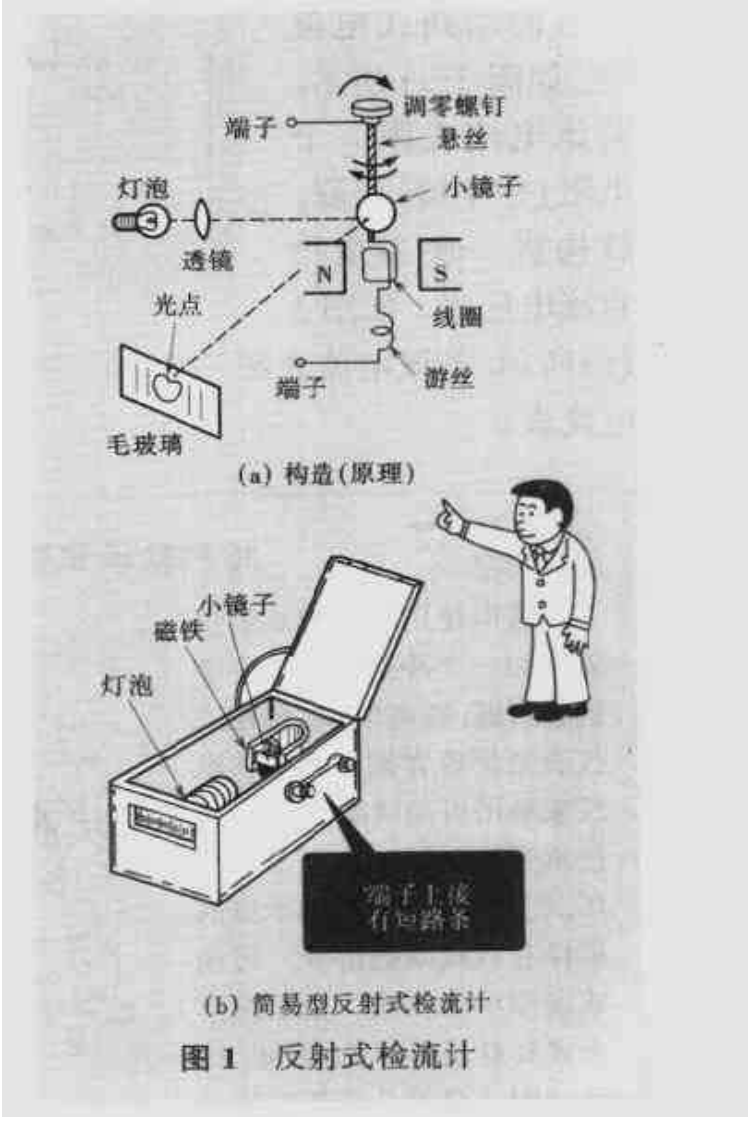



图 1　反射式检流计

检流计是能感知微弱电流的电流计，其构造是利用**动圈式**仪表的原理。图 1(a)示出了**反射型检流计**的原理。若在两端子间流过微弱电流，电流就通过悬丝（带状金属线）流经线圈，产生驱动力矩。固定在悬丝上的镜子（薄而小的镜子）也同线圈一起偏转。来自灯泡的光通过镜子反射，在毛玻璃面上形成光点。若有电流流通，光点就左右偏转，若电流增大，偏转也成比例地增大。检流计的**电流灵敏度**是表示令光点偏转 1mm



所需要的电流，一般的检流计的电流灵敏度为 $10^{-7}$ ~ $10^{-11}$ A/mm。图 1 (b)所示检流计的灵敏度非常高，为 $10^{-8}$ A/mm。为了避免在搬运时损坏仪表，在测量端子接有**短路条**。若置于磁铁中的线圈一动，就产生感应电动势，由于端子间被短路，所以该电流就产生阻止线圈偏转的反向作用力，电子式短路就使线圈固定不动。除用电子式短路条以外，还有的采用以机械方式固定可动线圈的方式。

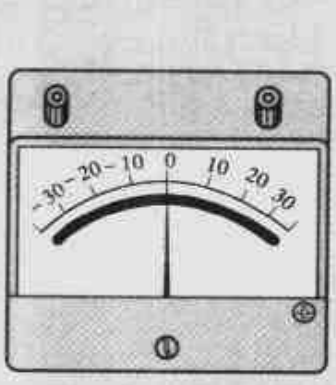


图 2　指针式检流计

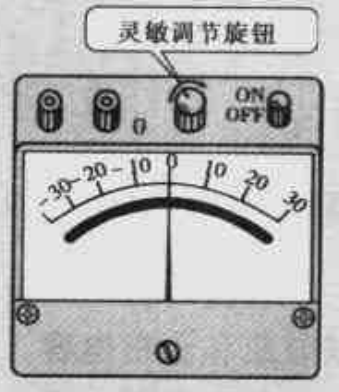


图 3　电子式检流计

## 使用简单的检流计

检流计除反射式以外还有如图 2 所示的**指针式**。与反射式相比，它的灵敏度较低，为反射式的十分之一左右。

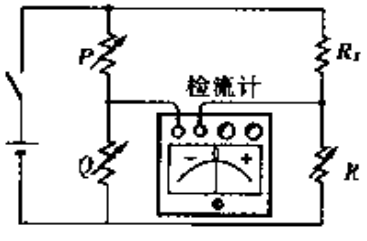
图 3 所示为**电子式检流计**，它是在动圈式检流计中增设直流放大器，转动灵敏度调节旋钮就可改变放大倍数，与其它的检流计相比，使用极其简单，因此，现在几乎都使用这种检流计。



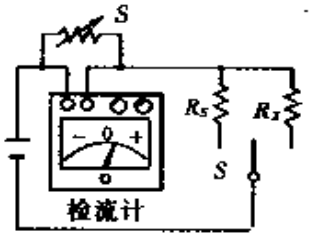
### 检流计的测量方法

右图(a)示出用惠斯登电桥测量电阻的电路。测量时将检流计的指针调整到零，叫做**零位法**。

图(b)所示是测量高阻值电阻的电路，若已知电阻 $R_S$ 使检流计的指针偏转 $\theta_1$，分流器的倍率为 $m_1$，高阻值电阻 $R_X$ 使检流计指针偏转角为 $\theta_2$，倍率为 $m_2$，根据这些值就可以求出 $R_X$。这种根据检流计指针偏转进行测量的方法叫做**偏位法**。

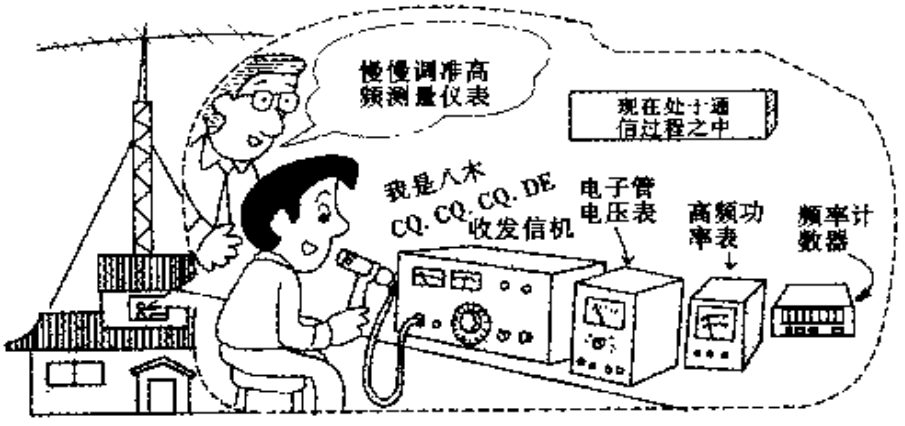


(a) 用惠斯登电桥的零位法



(b) 测量高值电阻的偏位法

# 4 高频测量仪表




## 高频测量时应考虑的问题

直流与低频测量时问题不太引人注意，高频测量时成为大问题的是**趋肤效应**和**分布电容**。

对于在图 1 所示导体中流过的电流，当频率很高时电流仅在靠近导体表面的部位中流过，而导体中心几乎没有电流流通，这种效应叫做**趋肤效应**，频率越高导体的**有效电阻**越大(损耗增大)。

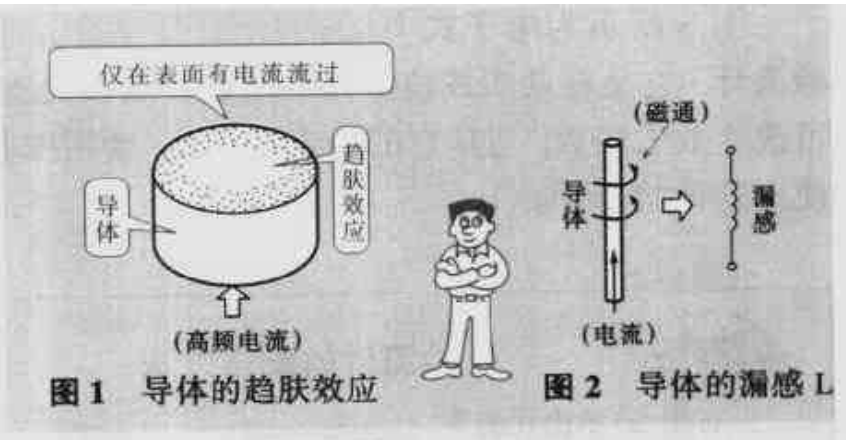



图 1　导体的趋肤效应　　图 2　导体的漏感 L

如图 2 所示，若直线导体中也流经高频电流，在其周围产生磁场，形成很小的电感。这种电感叫做**漏感**，高频时作为感抗，它会带来较大的影响。

其次，如图 3 所示，线圈的导线变成了电极，导线之间形成静电电容，这种电容叫做**分布电容**，高频时，电容 $C_0$ 的影响增大。图 3(b)所示是线圈(圈数少的线圈)的等效电路，高频时形成 $L$、$C_0$ 的谐振电路。

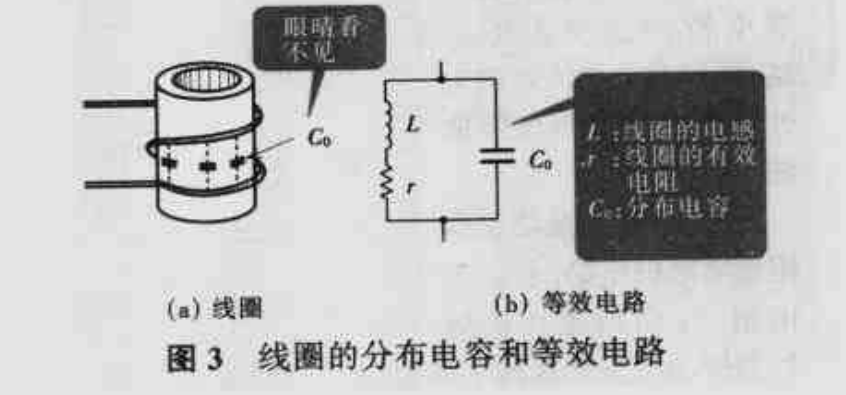



图 3　线圈的分布电容和等效电路



## 用热电偶测量电流

测量高频电流时，电流从图 4(a) 所示热电偶的热线中流过，热电偶因焦耳热而产生感应电动势。这个热电动势产生的电压加到直流电流表上，就使指针偏转。

真空热电偶的漏感和分布电容可以忽略，因此，适用于高频测量。

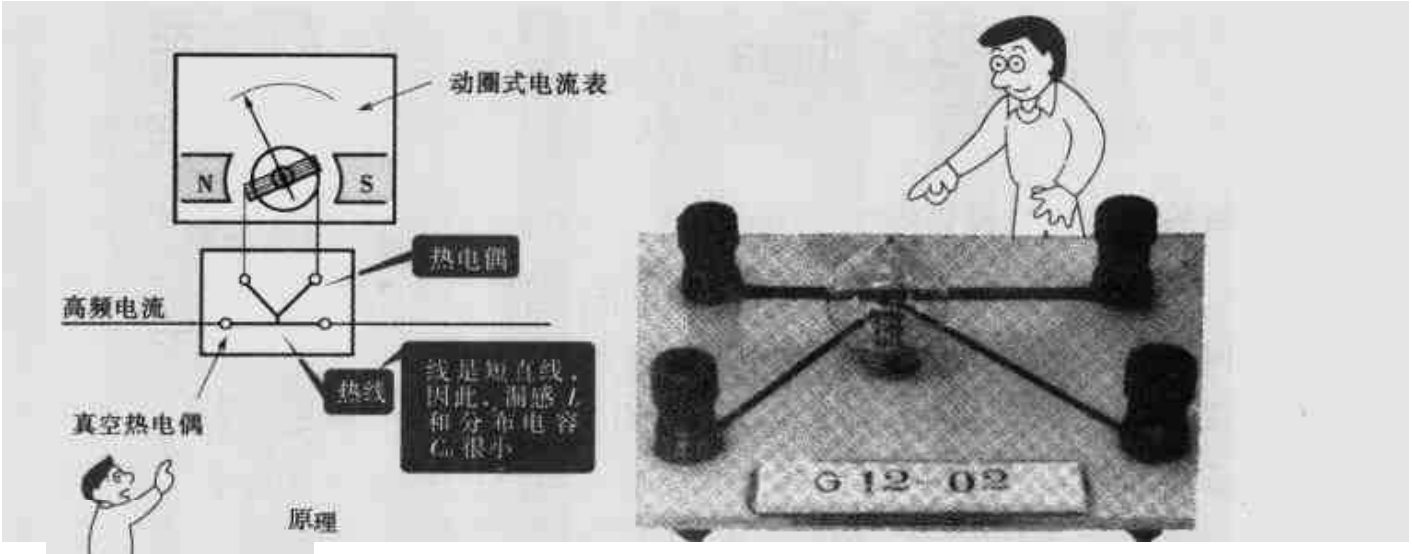


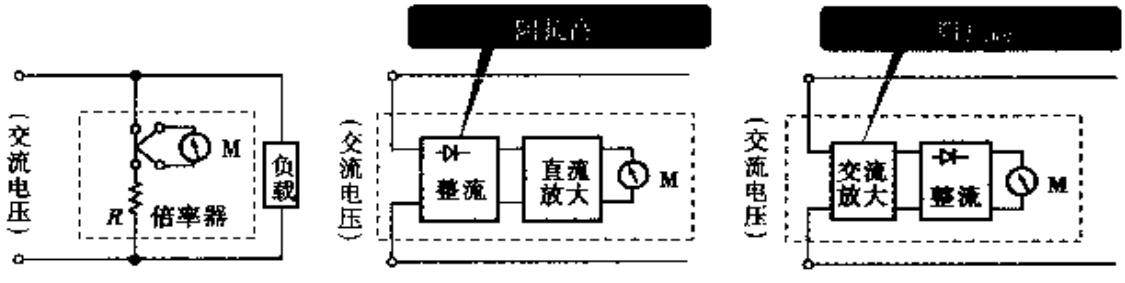

图 4　热电式电流表



### 各种高频电压测量仪表



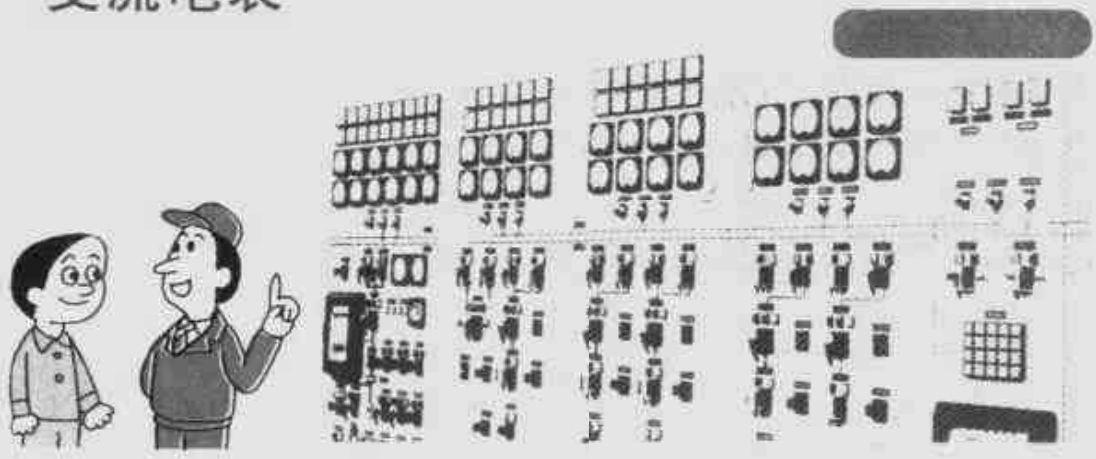
高频特性非常好的仪表有下图所示的电压表。图(a)所示是热电式电压表中接入倍率器，缺点是输入阻抗 $Z_i$ 很低。若 $Z_i$ 低，产生电路压降，就不能进行正确的测量。图(b)和(c)所示是电子式仪表，使用高输入阻抗的放大器，因此，即使输入电流很微弱在测量时也不会产生误差。




(a) 热电式电压表　(b) P 形电子电压表　(c) 毫伏表

(M 均用直流电流表(Ⓐ))

## 5 交流电表



结实的交流测量仪表——动铁式

测量工频电源的交流电压和电流时最广泛使用的是**动铁式仪表**。这类仪表构造简单，而且对过电流有较强的承受能力，是一种非常结实的仪表。

工作原理如图 1 所示，靠近磁铁的铁片被磁化为 NS，而 NN 和 SS 互相排斥，从而使指针偏转。

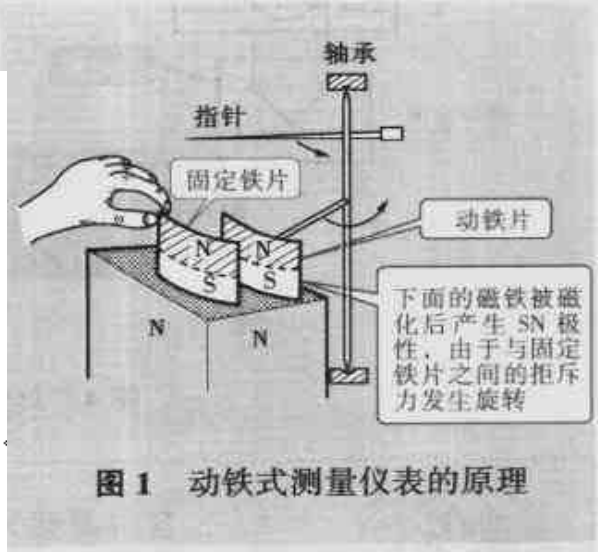



图 1　动铁式测量仪表的原理

图 2 是不用磁铁产生磁场，取而代之的是在圆筒型线圈中流经被测量电流而形成的磁场，由于磁场的作用，固定铁片与可动铁片以同方向同极性被磁化，铁片相互间产生排斥力。这个排斥力与游丝控制力矩达到平衡时指针就停止偏转。

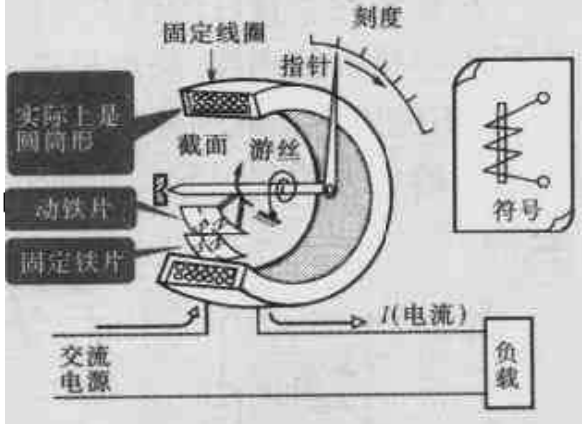


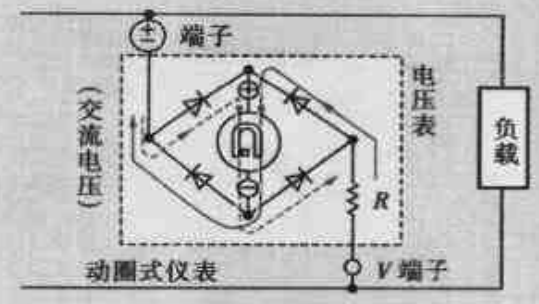

图 2　排斥型动铁式电流表

由于铁片磁化力的大小随流经固定线圈的负载电流的大小而变化，所以指针偏转角与负载电流成正比。然而，仪表的刻度不是完全均匀的刻度，因此，在微小电流刻度处，指针偏转灵敏度较差。而在图 2 中有所改善，在这种仪表中带有采用空气制动的制动装置。

稍加改进就构成高灵敏度的测量仪表

用于直流测量的高灵敏度的测量仪表是动圈式仪表。动圈式测量仪表稍加改进就可用于交流测量。如图 3 所示，采用 4 个整流二极管构成桥式整流电路，经全波整流后的电流流经动圈式电流表。整流式仪表的刻度相对于直流刻度略低 10%，除零点附近外都是均匀刻度。

流经直流电流表的电流方向如图 3(a) 所示，± 端子接⊕时，电流方向如虚线所示，*V* 端子接⊕时，电流方向如实线所示，因此，表中的电流总是从⊕流向⊖。




(a) 整流式电压表



(整流式电压表)
(b) 符号

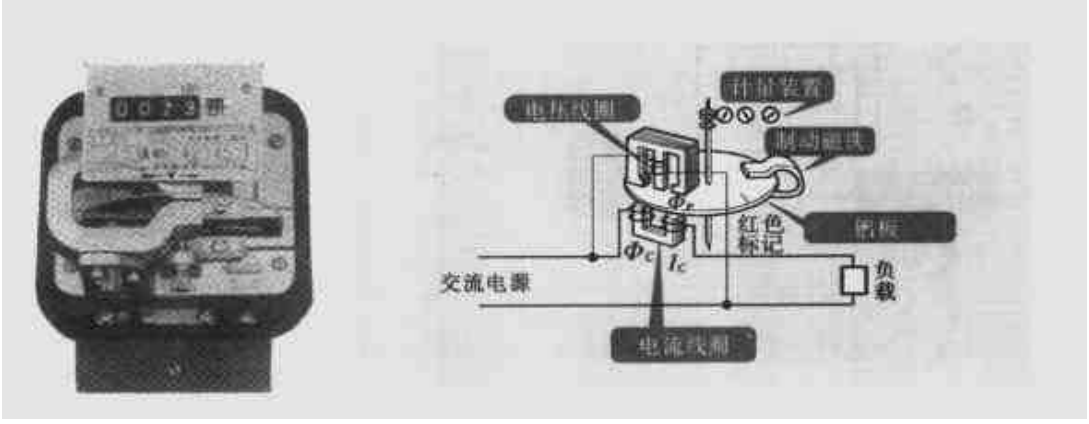


图 3　整流式测量仪表

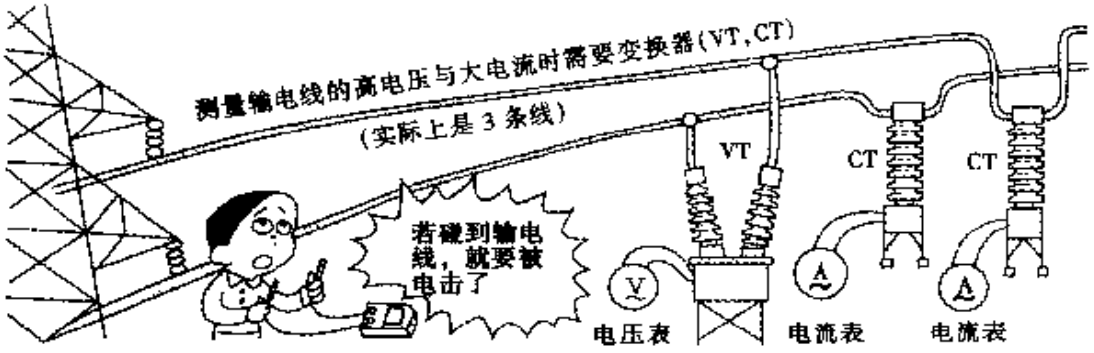
## 电度表的内部结构

**电能可用功率 × 时间来表示。**如下图所示，用电压线圈和电流线圈在圆盘中形成与功率成正比的旋转磁场，因为圆盘随着时间而转动，所以，用计量装置显示的量就是电能。

若负载开关断开，则电流变为零，圆盘因惯性的作用不能立即停住。因此，用制动磁铁夹在圆盘两侧，切断电流就使圆盘立即停转。左下角的照片就是民用电度表。



# 6 高电压与大电流的测量




## 使用变压器的电压表

测量输电线那样的交流电的高电压与大电流时，若把测量仪表直接接入电路中是非常危险的。测量仪表要与高压电路进行隔离，安全措施就是**测量仪表的变换器**。用于电压测量的是**测量仪表用变压器**（VT: Voltage Transformer），用于电流测量的是**变流器**（CT: Current Transformer）。

测量仪表用变压器如图1(a)所示，它与普通变压器一样，因此，将二次绕组电压 $V_2$ 与匝数比 $N_1 / N_2$ 相乘就可求出未知的一次绕组电压 $V_1$。

另外，就是使用上的问题，一次绕组上加高电压时，二次绕组开路也未必有危险，若发生短路则非常危险。也就是说，二次绕组中流过短路电流，为了补偿二次绕组的功率，一次绕组要流过较大电流，这就会导致测量仪表用变压器被烧毁。

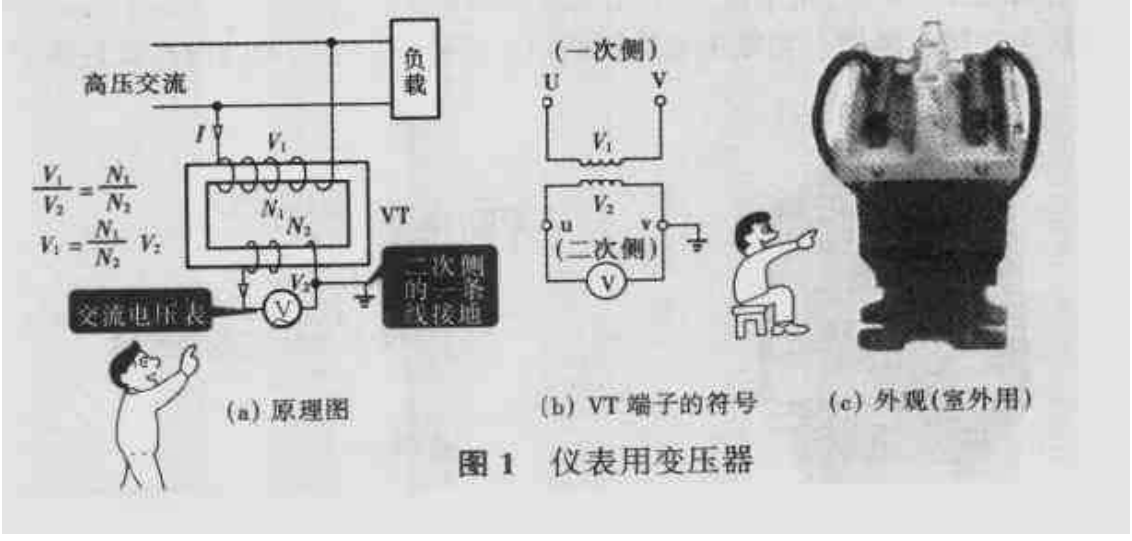
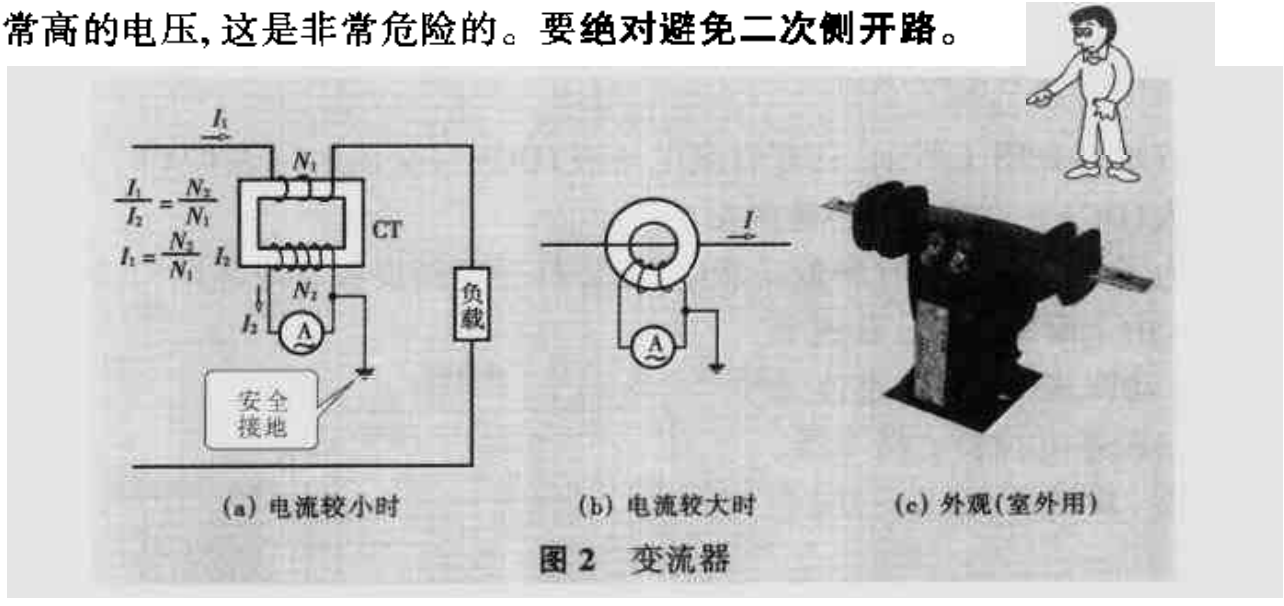



图1 仪表用变压器

称为变流器的一种变压器

为了测量负载中流过的大电流，使用被称为**变流器**的一种变压器。如图 2(a) 所示，一次绕组与负载串联，二次绕组接到电流表。若忽略变流器的励磁电流*，则 $I_1 / I_2 = N_2 / N_1$，因此，测得二次侧电流就立即能计算出一次侧的大电流[由 $I_1 = I_2 \times$(匝数比的倒数)求出]。

大电流(1000A 以上)用的变流器如图 2(b)所示，一次绕组常用一根直线导体。变流器的二次侧通过电流表使其短路。一次侧有电流流通时，若二次侧开路，负载电流全部作为励磁电流而工作，那么二次绕组上就产生非常高的电压，这是非常危险的。要**绝对避免二次侧开路**。



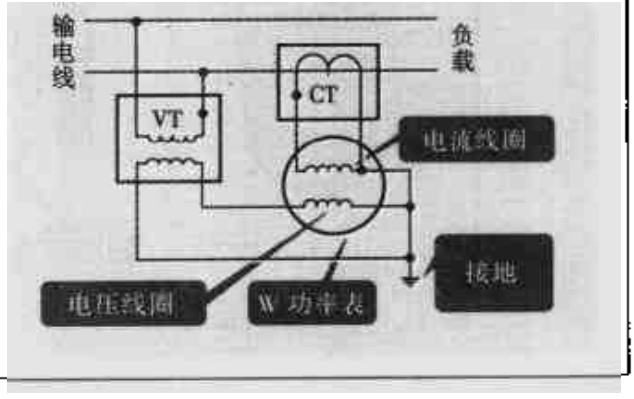

(a) 电流较小时　(b) 电流较大时　(c) 外观(室外用)

图 2　变流器

Let's try

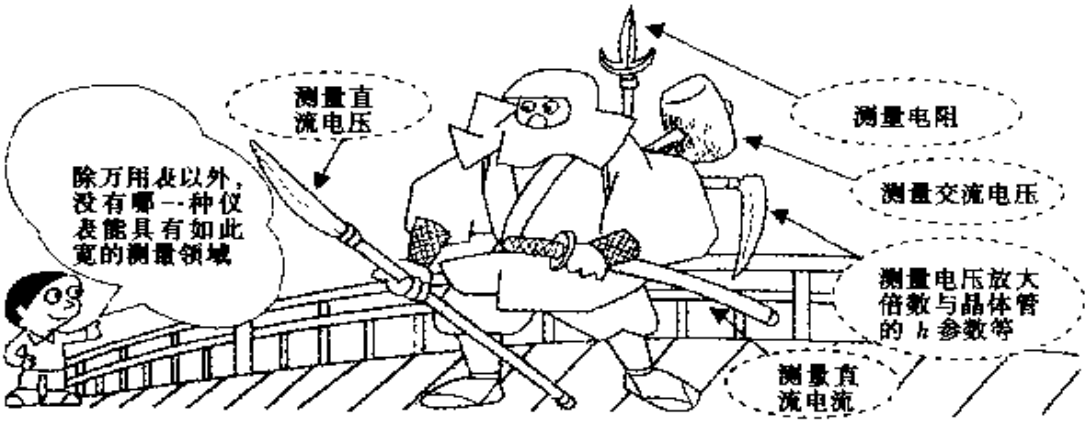
## 输电线的功率测量

正如对高电压及大电流中的电压和电流测量使用变压器和变流器那样，功率测量时也要使用右图所示那样的测量仪表用变压器和变流器。功率表是一般的电动式仪表，变压器的二次侧接电压线圈，变流器的二次侧接电流线圈。




* 励磁电流是不能忽略的。正因为有励磁电流，才能在铁芯中产生交变磁通，从而在次级绕组中产生感应电流 $I_2$。此句似应改为"若忽略变流器的漏磁磁通"。——校者注

# 7 电路测试器(万用表)




## 打开万用表看看内部结构

万用表如图 1 所示，具有直流电压表(DCV)、交流电压表(ACV)、直流电流表(DCA)、欧姆表(Ω)等测量功能。

为了弄清这些具有测量功能的电路，打开万用表看看内部结构。如图 2 所示，由上而下，可以看到干电池、动圈式电流表、整流二极管、调零电位器、倍率器、分流器、旋转开关、⊕⊖端子等。

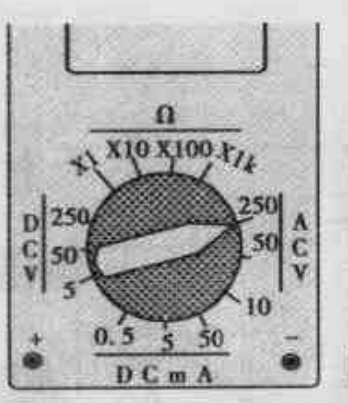



图 1 万用表的量程

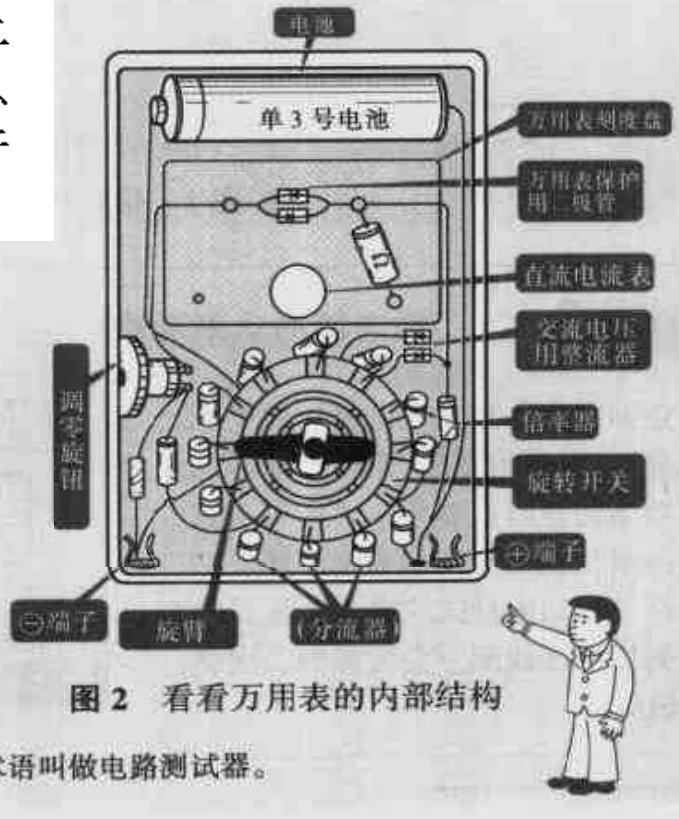



图 2 看看万用表的内部结构

[注]万用表的正式电气术语叫做电路测试器。



### 万用表的测量方法

用 DCV 测量时要注意表笔的极性。其次是选择量程，从大量程到小量程，应选择那些能使指针达到较大偏转角的量程。

在测量家用万能插座的电压时，如图 3(b) 所示，先放在 ACV 的量程上，然后把表笔插到万能插座内（表笔的极性无关）。

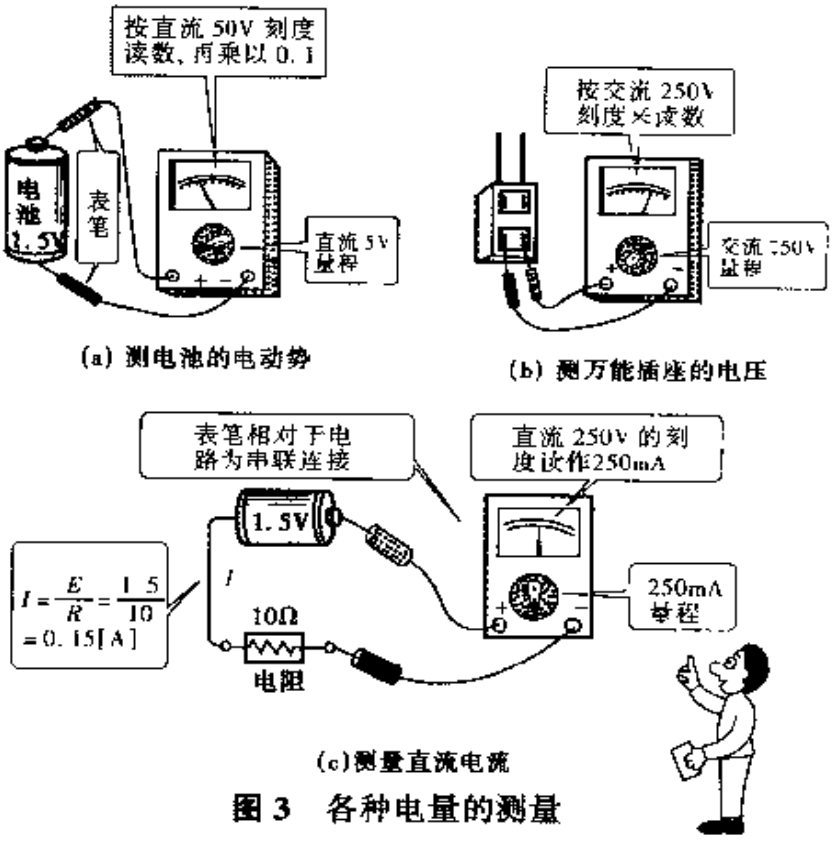



图 3　各种电量的测量

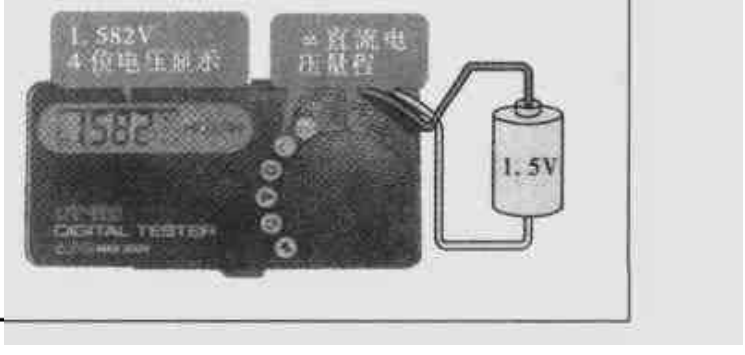
读交流电压的刻度时，请注意有与直流量程的刻度不同的场合。电流测量时要估算流过的电流大小，确认不会有过电流从万用表中流过之后，再接上表笔进行测试(下节介绍欧姆表功能的使用方法)。



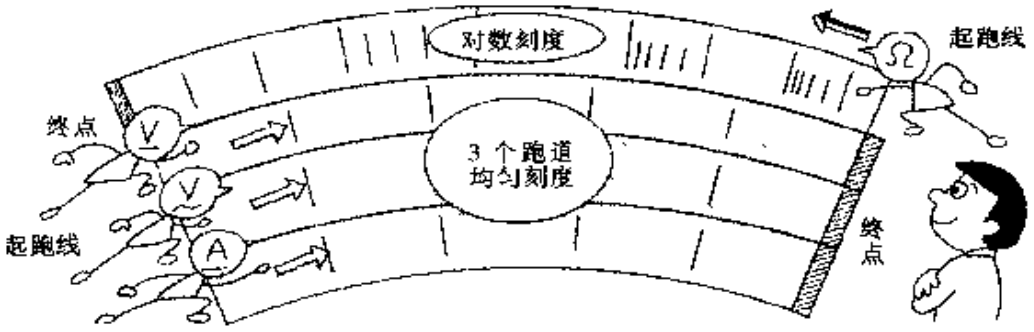

#### 非常流行的数字万用表

最近，取代模拟式的数字式测量仪表成为主流，与模拟式仪表相比，数字式测量仪表的优点是，精度高、使用简单等。数字式仪表也有缺点，例如，不是在所有方面都胜过模拟式仪表，如变化量不容易读取等，因此，要根据需要分别选用。

右图表示用数字式万用表中的电压表功能来测量电池的电压。廉价的数字式仪表也有测量电压值达到 4 位精度的实例。



# 8 万用表的欧姆表功能




## 电流表变为欧姆表

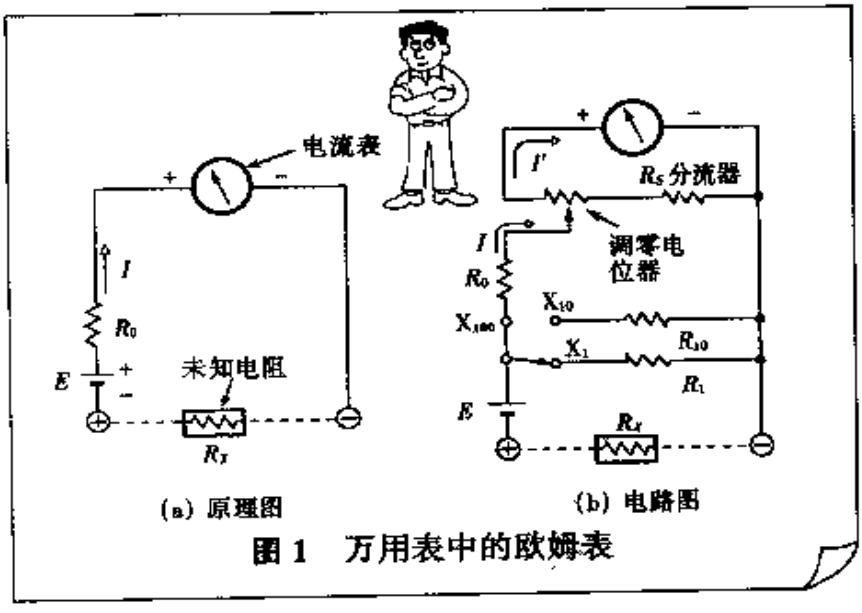



图 1 万用表中的欧姆表

用直流电流表构成测量电阻的电路如图 1(a) 所示，电池(请不要把极性接反)与电阻 $R_0$ 连接。若⊕⊖端子短接，就有 $I = E/R_0$ 的电流流过，这时指针偏转到最大值 (FS) (即电流读数达到满刻度，所对应的电阻读数为 0[Ω])。若把电阻 $R_X$ 接到⊕⊖端子，则得电流为 $I_X = E/(R_0 + R_X)$，当 $R_0 = R_X$ 时，$I_X = I/2$，指针指到中间。在这个位置上记入电阻 $R_X$ 的阻值，改变 $R_X$ 的阻值，根据指针偏转角度进行刻度就构成欧姆表。实际上，为了使电流表的工作电流 $I'$ 由大变小，要接入分流器，另外，为了根据电池的消耗情况进行补偿，增设调零电位器。

## 欧姆表的测量方法

测量电阻 $R_X$ 时，将旋转开关转到 Ω 量程。根据 $R_X$ 的阻值选用相应的 ×1、×10、×100、×1000 的欧姆档。也就是说，$R_X$ 较小时，选用 ×1 或 ×10 的欧姆档，然后，如图 2(a)所示那样，将表笔短接进行调零(0[Ω])。

接着就进行电阻的测量，但电阻读数要乘以倍率才是 $R_X$ 的阻值。






图 2　用万用表测量电阻

## 欧姆表刻度的读法

图 3 示出了欧姆表的刻度盘，指针指在如图所示的位置。若按下列量程进行测量，电阻是多少欧姆？

$R \times 1$ 档 → 80 [Ω]

$R \times 100$ 档 → $80 \times 100 = 8$ [kΩ]

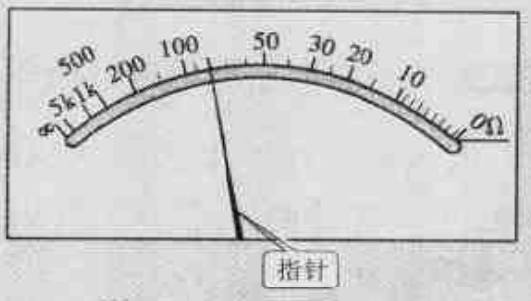


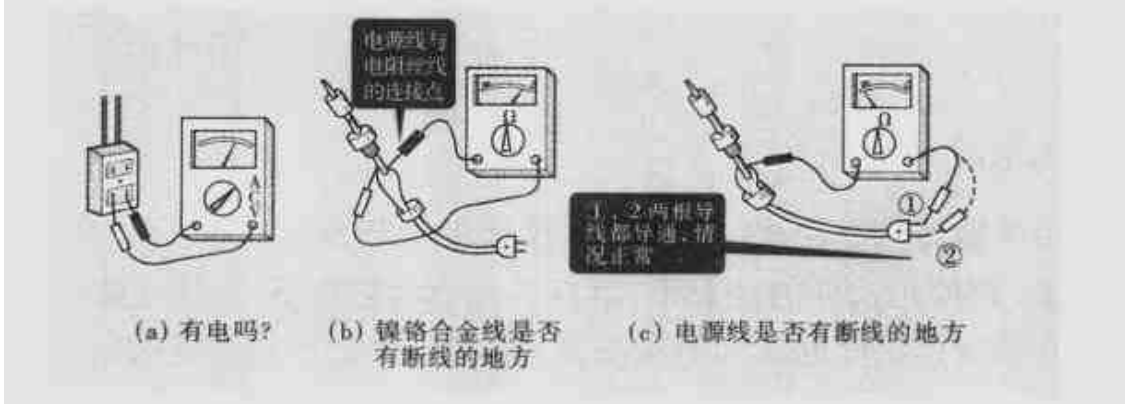

图 3　欧姆表的刻度盘





### 用万用表查找故障

电烙铁接上电源不热，原因是什么呢？为查找这个故障的部位，万用表发挥了非常大的作用。首先，测试万能插座的电源，电源正常，然后，拧下烙铁柄的后盖，测试判断电阻丝是否断开（断开时电阻指示为∞），结果为正常时再测试电线，若插头①②两端中有一端为∞，则断定这根电线有断开处。



# 9 接地电阻的测量




## 用直流法不能测出电解液的电阻

像海水那样导电的液体叫做**电解液**，带电者是**离子**，因此，若浓度增大，电阻就变小。

测量这种电解液的电阻时，如图1所示那样，若使用欧姆表，就有直流电流流过电解液，产生极化与电解，不能测得正确值。

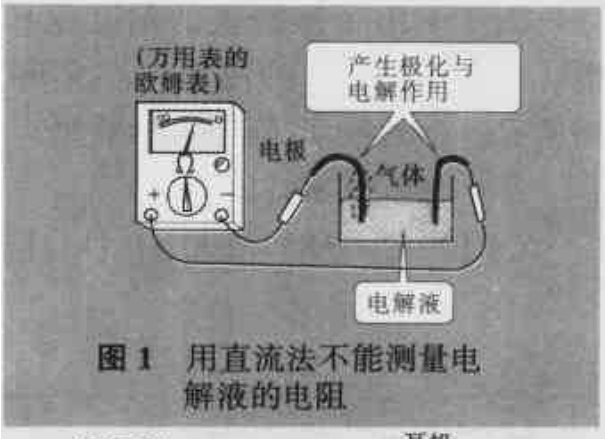



图1 用直流法不能测量电解液的电阻

那么，就要如图2所示那样，用交流电源的**科拉乌什电桥**进行测量。

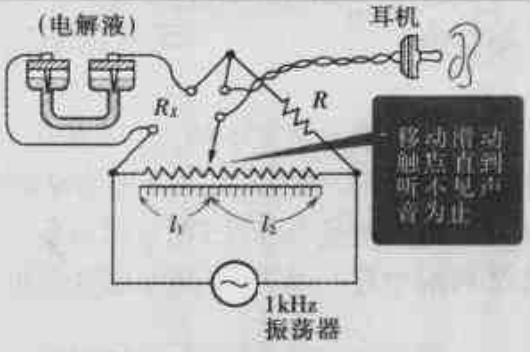



图2 科拉乌什电桥的测量

若设电解液的电阻为 $R_X$，可用下式求出电阻：

$$R_X = \frac{l_1}{l_2} R \quad [\Omega]$$



## 测量接地电阻

家用电器特别是用水的洗衣机、榨汁机等若发生漏水，引起**绝缘不良**就会**漏电**。若使用这样的洗衣机，就有麻木般的**触电**感觉，这是很危险的。根本的办法就是消除漏水和绝缘不良，但由于事先不知道什么时候会发生这种故障，所以，为了避免触电，洗衣机要通过金属水管**接地**（参见第1章4）。这样，即使漏电（形成电位），立即与大**地**同电位，即变为零伏特，这样



就能确保安全。然而，使用高电压的电气设备时，接地要根据有关条例确定**接地电阻**。“大地”即“土地”的电阻与电解液的一样，因此，可使用科拉乌什电桥或直读式接地欧姆表进行测量。图 3 示出了接地电阻的测量原理，辅助电极 $P_2$、$P_3$ 埋在土地里，用电压表 $V_1$ 测量接地电阻 $R_1$ 的压降 $IR_1$ [V]，从而计算出 $R_1$。图 4 示出接地测试器的外观图。

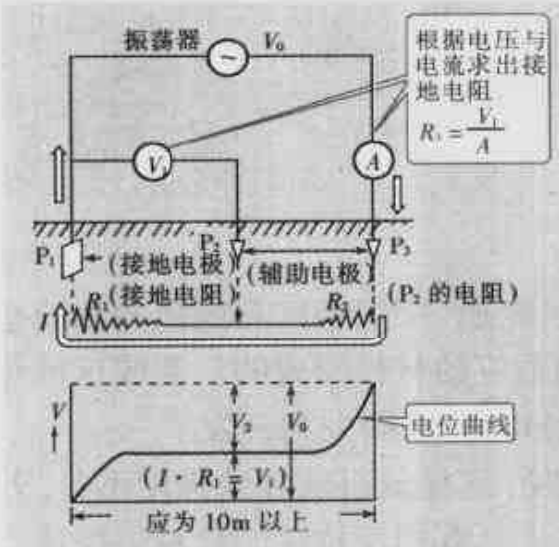



图 3　接地电阻的测量原理



图 4　接地测试器

也就是说，由振荡器的电压 $V_0$ 通过辅助电极 $P_2$ 的电阻 $R_2$ 和接地电极的电阻 $R_1$ 构成电流流通环路。如图 3 所示那样，当电极之间的距离*在 10m 以上时，中间部分电位曲线是平坦的，在 $P_1$、$P_3$ 之间**能测量的仅是接地电阻 $R_1$ 的压降。




## 外行人也能使用的 LCR 表

电路中使用的电阻 $R$、电感线圈 $L$、电容 $C$ 都是重要元件，若这些元件用于直流电路或交流电路中，其作用是限制电流，因此也叫做**阻抗元件**。

为了测量这些元件，需要交流电源，使用叫做万能电桥的测量仪表。最近，只要接上元件就能直接读出数值的测量仪表，即 **LCR 表**使用日益广泛。

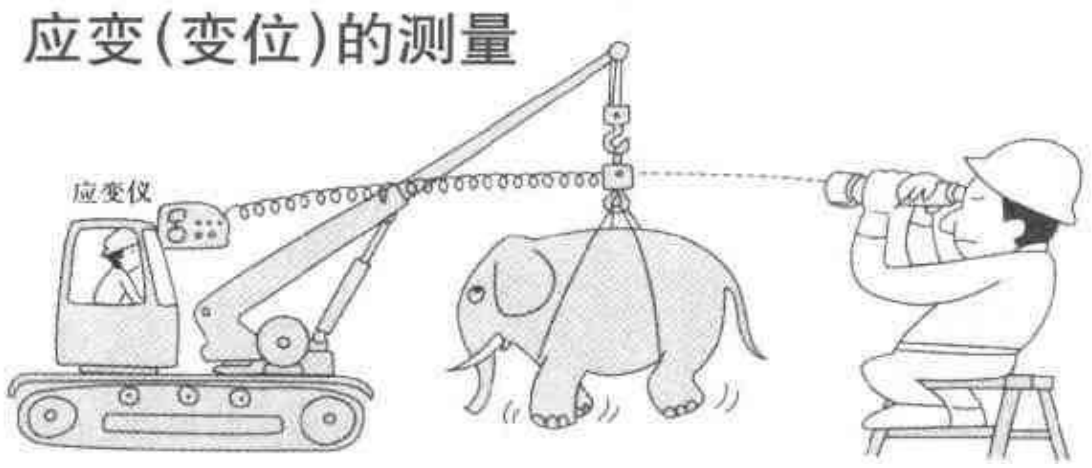



4 端子接线方法

* 指接地电极 $P_1$ 与辅助电极 $P_3$ 之间的距离。

** 原文似有误，应为“在 $P_1$、$P_2$ 之间”。　——校者注

# 10 应变(变位)的测量




## 应变与应力

在人们日常生活中的汽车、飞机、轮船、房屋等所有的建造物都是根据其各自的特殊功能要求，采用与其相适应的材料制成的。制成这些建造物的材料要求轻便、坚固、价廉，以此为目标进行研究和开发。

实际上，若要节省材料就要求轻便，这样就可能导致强度不足，若具有一定的强度，重量就会增加，因此，将具有相反特性的材料进行适当的配合，是设计上的重要课题。若对材料加力，它就与力成比例地伸长（弹性范围）。然而，若所加的力超过一定的值，材料就会变形（塑性范围）进而损坏。材料伸长的比率叫做**应变**，加在每单位面积材料上的力叫做**应力**。为了在材料的节省与安全的强度之间进行折衷，重要的是了解应力与应变之间的对应关系。

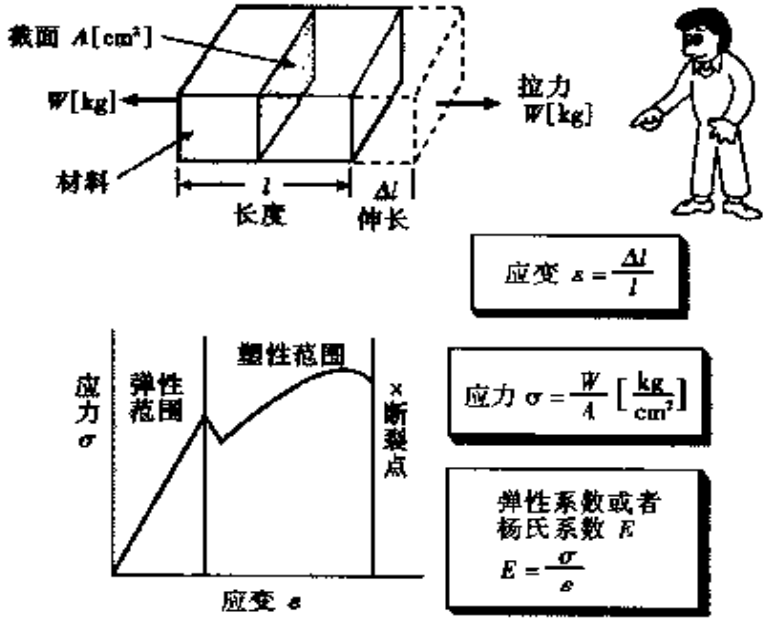



**图 1** 应变和应力及弹性系数之间的关系

这种关系叫做弹性系数或者杨氏系数 $E$，用下式表示：

$$E=\frac{\text{应力}\sigma}{\text{应变}\varepsilon}$$



## 应变的测量

测量变位或应变可使用测微计与游标卡尺，但不能测量更微小的应变。这里我们学习像铁板的伸长之类微小变位的测量方法。

检测应变的仪表使用图2所示的应变仪。如图3所示那样，把它紧贴在被检测的材料上，若对材料施加应力，材料的伸长也只是使应变片产生应变 $\Delta l$。即电阻线变得细长，因此，电阻值只增加 $\Delta R$。

很显然，如图3所示，应变 $\varepsilon$ 可用电阻的变化率来表示。

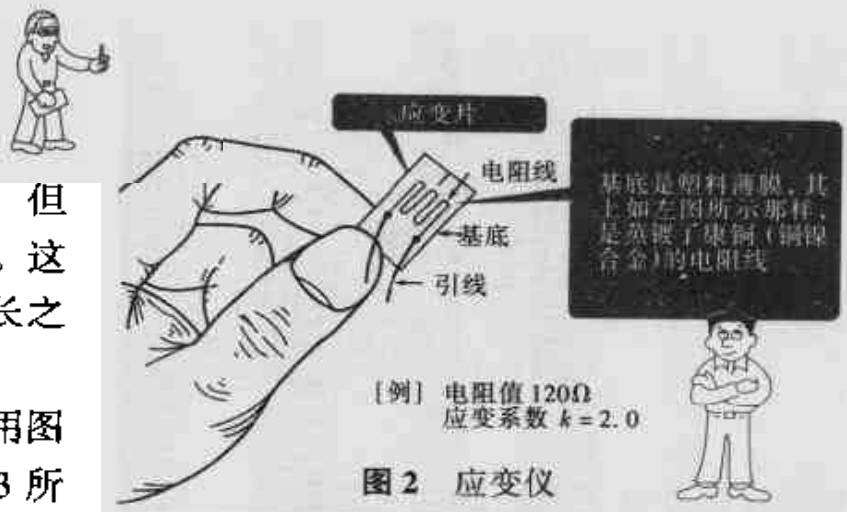



图2 应变仪

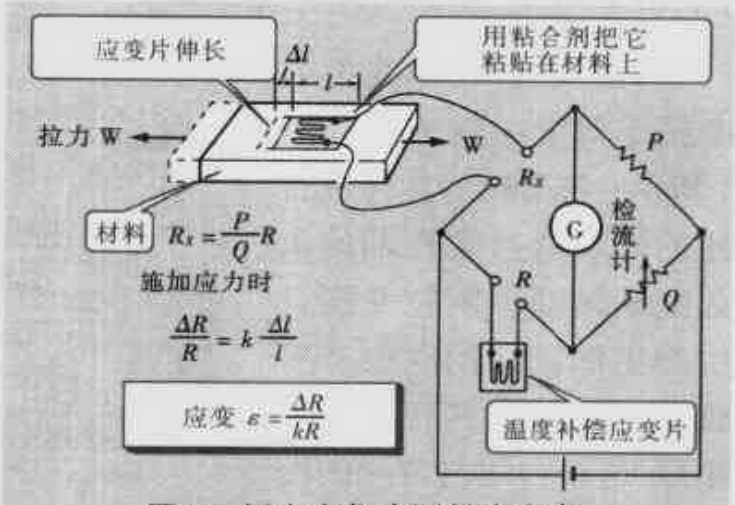



图3 用应变仪表测量应变率

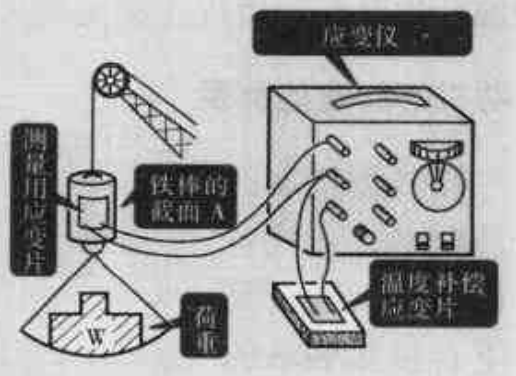
### Let's try 用应变仪测重量

在铁棒上贴上应变片，加荷重时测量值为应变 $\varepsilon=200\times10^{-6}$ 乘以铁棒的截面积 $A=500[\text{mm}^2]$ 以及铁的弹性系数 $E=2.1\times10^4$ [kg/mm²]。即可求出这时的荷重 $W$。

【解】

$$W=\sigma\cdot A$$
$$=\varepsilon\cdot E\cdot A$$
$$=200\times10^{-6}\times2.1\times10^4\times500$$
$$=2100\ [\text{kg}]=2.1\ [\text{t}]。$$

若使用 E 和 A 为已知的应变仪，则这样的应变仪就变成了重量仪。



# 11 转速的测量




## 行驶中的交通工具的速度的测量

安装在自行车或单人摩托车等上的转速表如图1所示，与车轮的转速成正比的转动通过柔性轴使永久磁铁转动。阿拉戈圆盘中产生涡流，同时也产生**驱动力矩**（使其转动的力矩），这个力矩与游丝的**控制力矩**平衡时指针的偏转就停止。若速度快，磁铁引起的涡流也就变大，指针的偏转角就与速度成正比地增大。

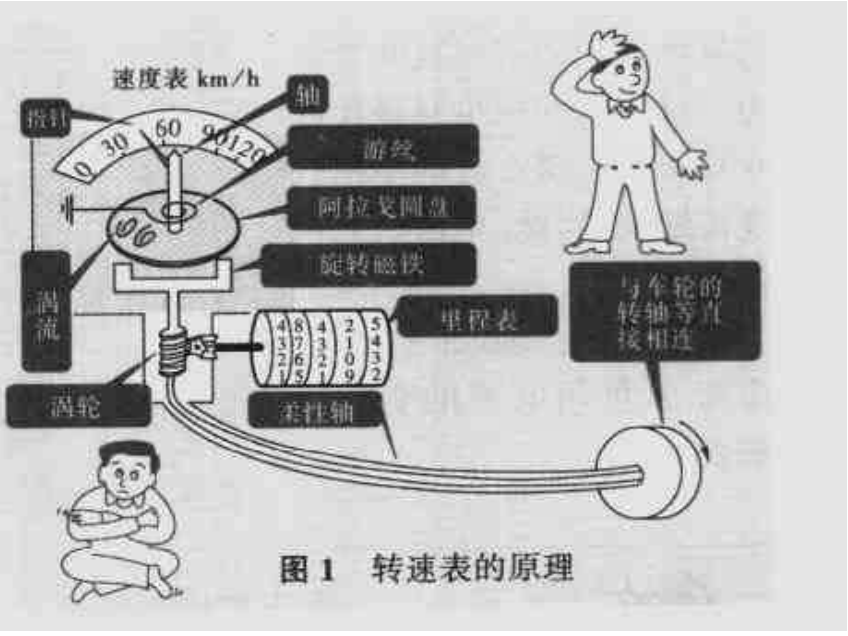



图1 转速表的原理

## 电动机等转速的测量

旋转类机器的转速测量有各式各样的方法，现研究一下直接接触轴的测量方法。

电子式转速测量有多种方式，例

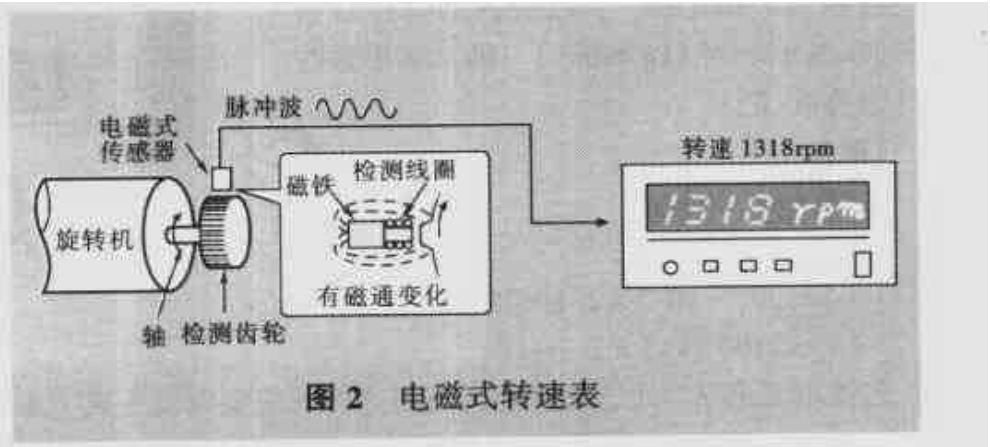
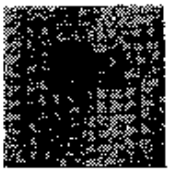



图2 电磁式转速表



如将转速变换为电压的方式，检测旋转体磁性的电磁式，检测贴在旋转体上的反射板的光的光电式等等。

图 2 示出了电磁式转速表的结构图，由于检测绕组中产生脉动电压，所以，把此电压加到数字显示器上，经过运算处理，就显示出旋转体每分钟的转数，即转速。

### 利用光的转速表

光电式转速表的结构如图 3 所示，在旋转轴上贴有反射标记，反射来自发光二极管的光脉冲。转轴每转 1 圈，反射光就被投射到光电三极管。对输入光脉冲进行检波、积分、波形整形后就以数字方式显示出作为每分钟转数的转速。

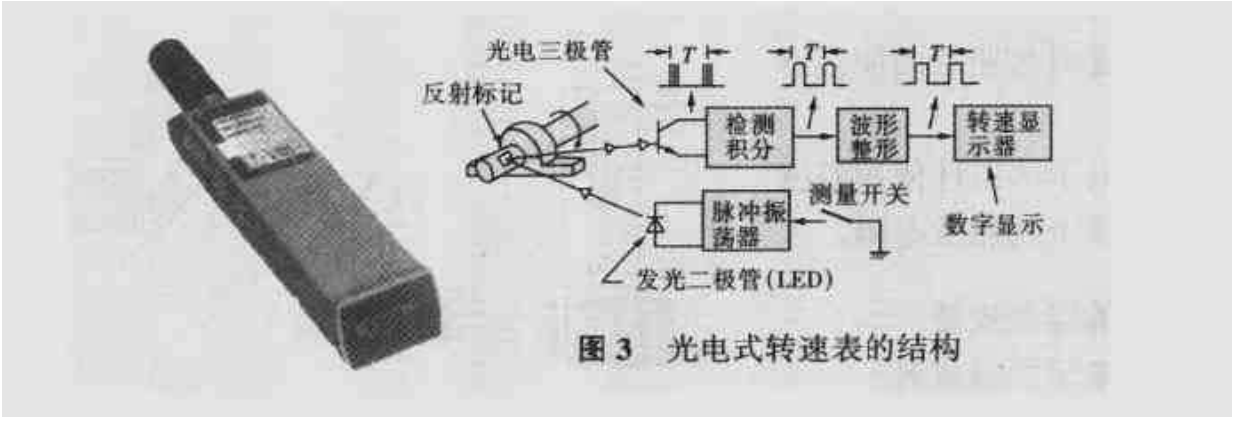
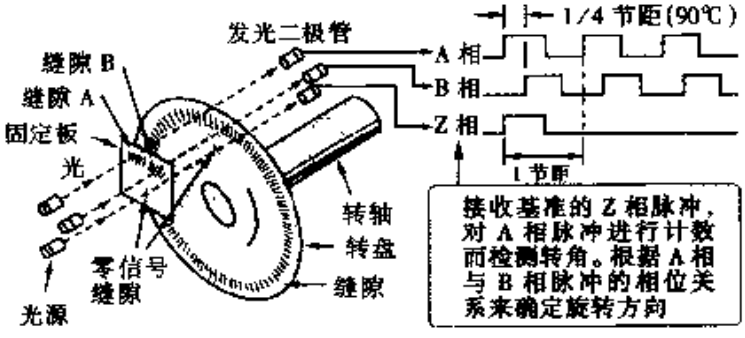



图 3　光电式转速表的结构



### 用旋转编码器检测转角

在用微机控制的工作机器以及工业机器人中使用伺服电动机。伺服电动机进行定位控制时需要转角检测器，这就是常说的旋转编码器。



# 12 温度的测量




## 普通温度计

图 1 是家庭等场所用的温度计，可以测量气温、液温、体温等。酒精温度计是利用液体的热膨胀来测量温度。双金属温度计的工作原理是双金属的温度引起伸缩而使指针偏转。

电子体温计使用温度传感器中的热敏电阻。




图 1　各式各样的温度计

## 正确的温度测量——电阻式温度计

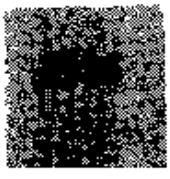
金属丝的电阻随温度成正比地增大。

测量电阻的变化，并变换为温度就是所说的电阻式温度计。这个电阻变化非常小，因此，以前使用直流电桥电路进行测量，但现在，广泛使用数字式电阻计。

图 2 示出了数字式电阻温度计，温度传感器采用铂丝。铂丝具有耐高温




图 2　数字式电阻温度计



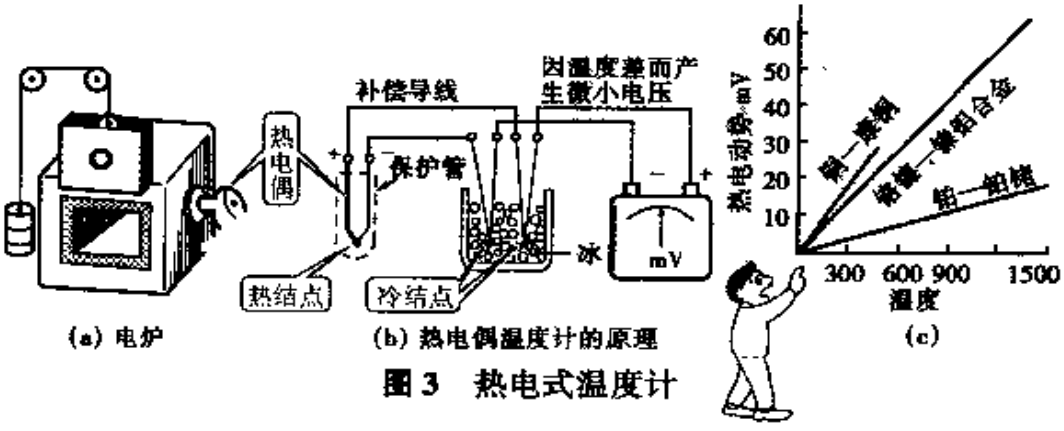
的特性，广泛用作高温传感器。

图 2 的温度测量原理简述如下：铂电阻丝流经微弱的电流，用数字电压表测量其压降，这个电压换算为温度就是所要测量的温度。

### 炉温的测量——热电式温度计

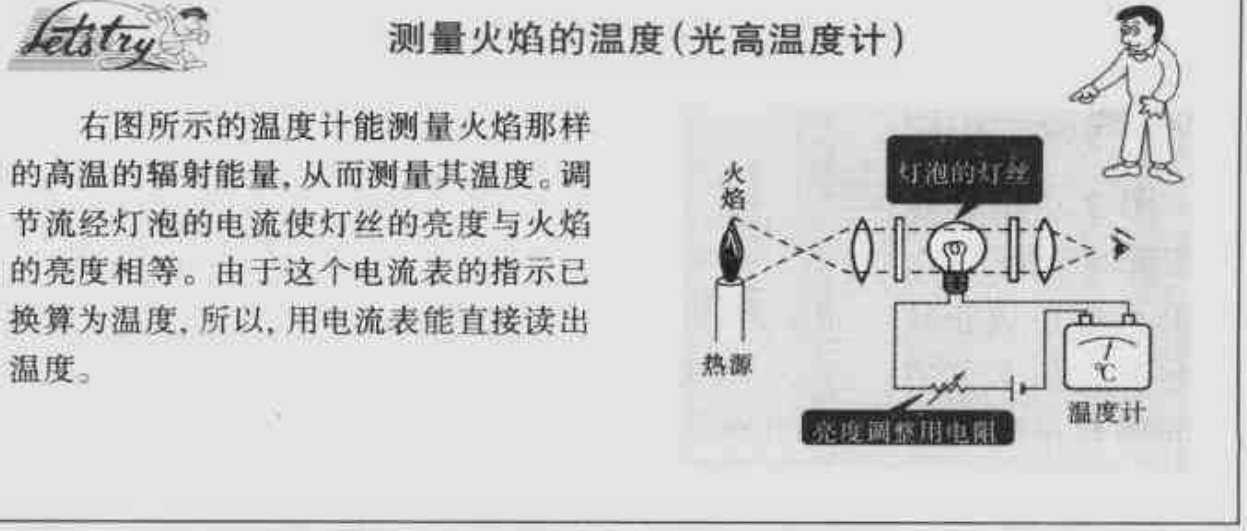
热电式温度计的原理如图 3(b) 所示，热电偶产生**热电动势**，其大小与热结点和冷结点的温度差成正比，利用这种热电效应进行温度的测量。若把热电偶放入被测温度的炉内，另一端的冷结点放入恒温槽中，这时热电偶两端产生的电动势与温度差(图 3(c)) 成正比，因此，就可以测量炉内温度。

测量 400℃以下的温度时采用铜(－) - 康铜(＋)等热电偶，对 1000℃以上的高温，采用铂 (－) - 铂铑(＋)热电偶。

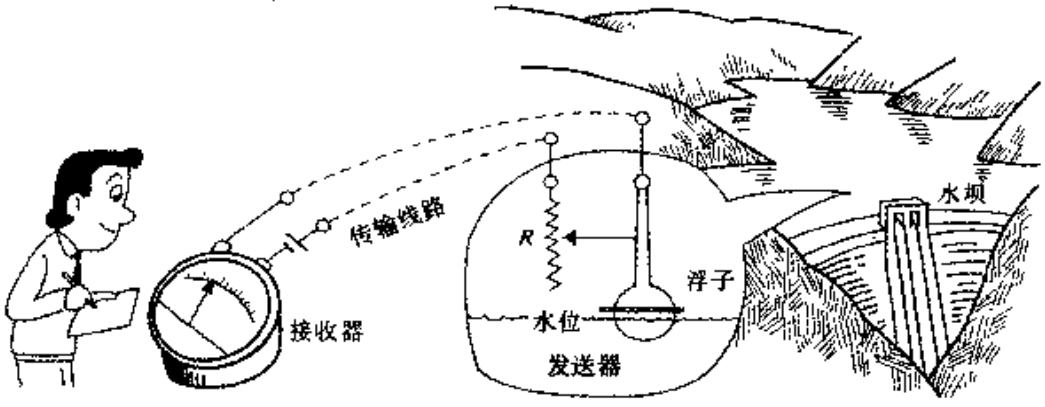



(a) 电炉　(b) 热电偶温度计的原理　(c)

**图 3　热电式温度计**



# 13 遥　　测




## 有误差的直接传送方法——电流测量

把远方的测量值若变换为电信号进行传送，就能正确地测量其瞬时值。这样的**遥测**有直接传送法、平衡式、编码式等，首先讨论电**流直接传送法**。

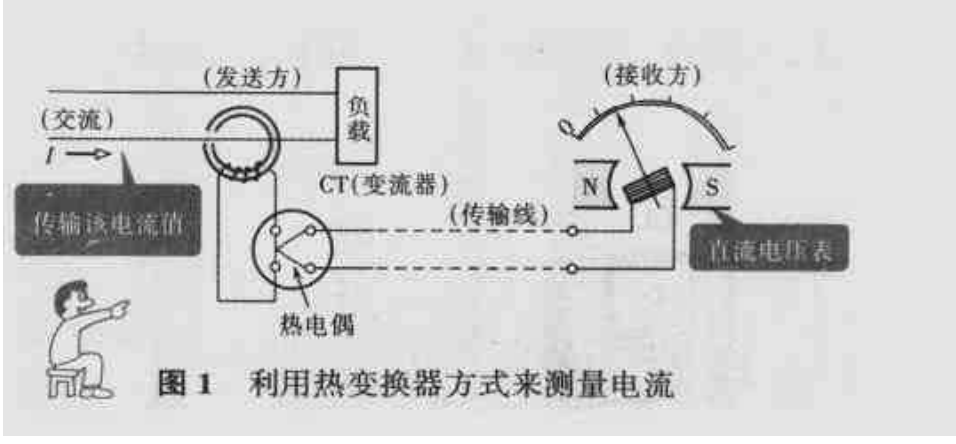



图 1　利用热变换器方式来测量电流

图 1 示出传送负载的电流值，通过变流器变为很小的值，经热电偶转换成直流电压，再通过传输线传送到电压表，电压表对此进行测量。**这种方式叫做热变换方式**。直接传送法也是一种受到传输电路电阻与电感的影响，因而容易产生误差的方式。

## 减少误差的平衡法

图 2 示出远距离测量流量的方式，浮子与流量成正比地上下浮动。发送方的电感与接收方的电感通过传输线路

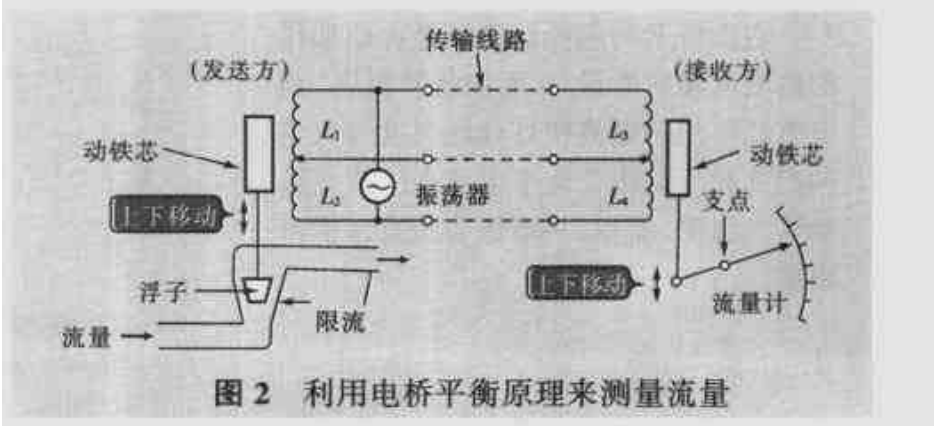



图 2　利用电桥平衡原理来测量流量



的连接构成交流电桥。

若流量增大，发送方的动铁芯向上移动，因此，$L_1$ 的电压增大，所以，接收方 $L_3$ 的电压也增大，接收方的动铁芯往上拉指针。也就是说，接收方的动铁芯跟踪着发送方动铁芯的位置，这样，基于磁力的作用使电桥达到平衡状态。

### 靠传送脉冲测量功率

图 3 示出遥测电度表，在功率测量中，由于功率与圆盘的转速成正比，使得圆盘的小孔遮断光形成脉冲，根据每 1 秒钟的脉冲数就可测出功率。通过遥测的脉冲法是一种无误差的测量方法。遥测电度表跟阿拉戈圆盘的旋转原理相同，铝圆盘的上下安装有电压线圈和电流线圈，圆盘上产生涡流，就产生驱动力矩使圆盘旋转。

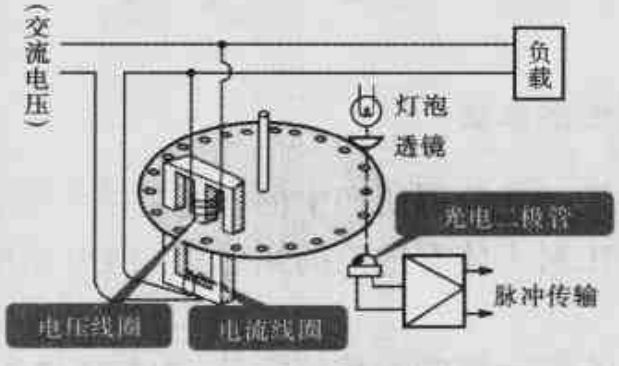


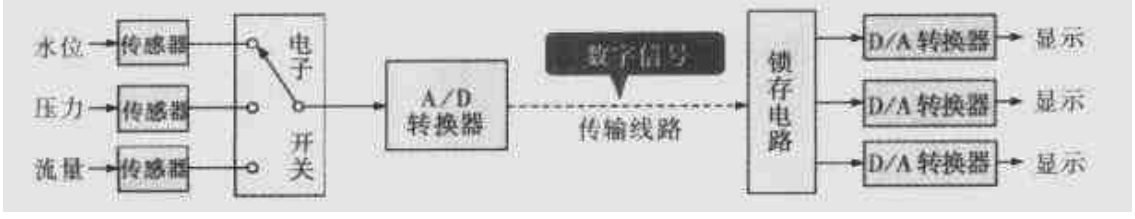
图 3　利用脉冲传送方式来测量功率

若负载电流增大，则转速也就与其成正比地提高。电能是转速即脉冲数积分的结果，但功率可用每秒脉冲数进行测量。

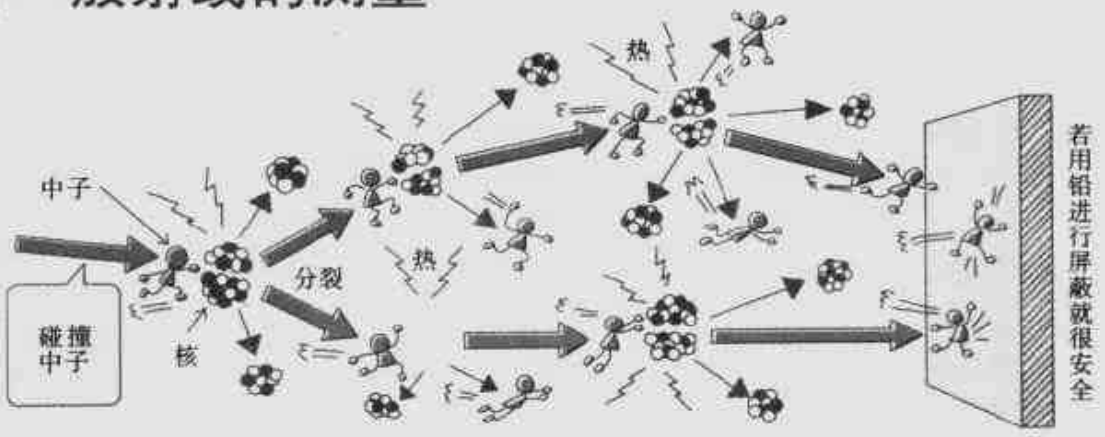


### 远距离传送采用数字方式最佳

本节开头的插图绘出了深山里水力发电站的景像。这样的发电站实现了无人化管理，水位、压力、流量等都进行遥测，另外，根据测量结果进行遥控，使诸参数都达到最佳值。各传感器检测的模拟量经 A/D 转换器变换为数字信号并进行传送。数字传送的抗噪声能力很强，测量的数据最适用于计算机处理。



# 14 放射线的测量




## 放射线的本质

原子核分裂所产生的核能量是人类获取的最有效的能量，但由于同时也发出对人体有危险的辐射能，所以使用时要充分注意，需要有正确的知识。

本节介绍的不是核能量，而是将**放射性同位素**发出的**放射线**应用于工业测量领域的情况。

图 1 说明**放射性同位素**（原子炉生成的放射性同位素）产生的三种射线的性质，***α* 射线**具有 + 电荷，它是最重的，也难以穿透纸等。***β* 射线**具有 − 电荷，难以穿透金属板。***γ* 射线**是与 X 射线相同的电磁波，可以穿透金属等，但不能穿透铅板。

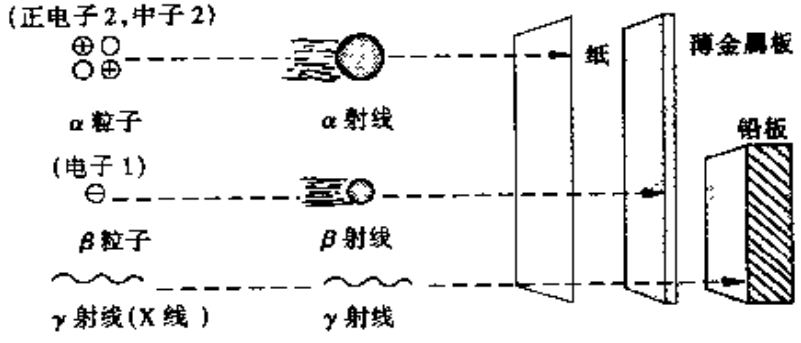



**图 1** 表示放射线的本质与透过力

利用穿透力随放射线的种类不同而异的性质可以测量物体的厚度。另外，放射线也用于癌症治疗等医学领域。

## 放射线的检测器

检测放射线可利用气体的**电离作用**、**发光现象**、**胶片的变黑**等。这里介

绍作为测量仪器的电离箱和盖格(GM)计数管。

❶ 电离箱　在图2所示的圆筒形电极（－）与芯线（＋）上施加电压。射线一碰到气体分子就发生电离，产生＋离子和－离子，库仑力把各离子吸引到电极，这时就有电流流经电阻$R$，据此就可测量射线。

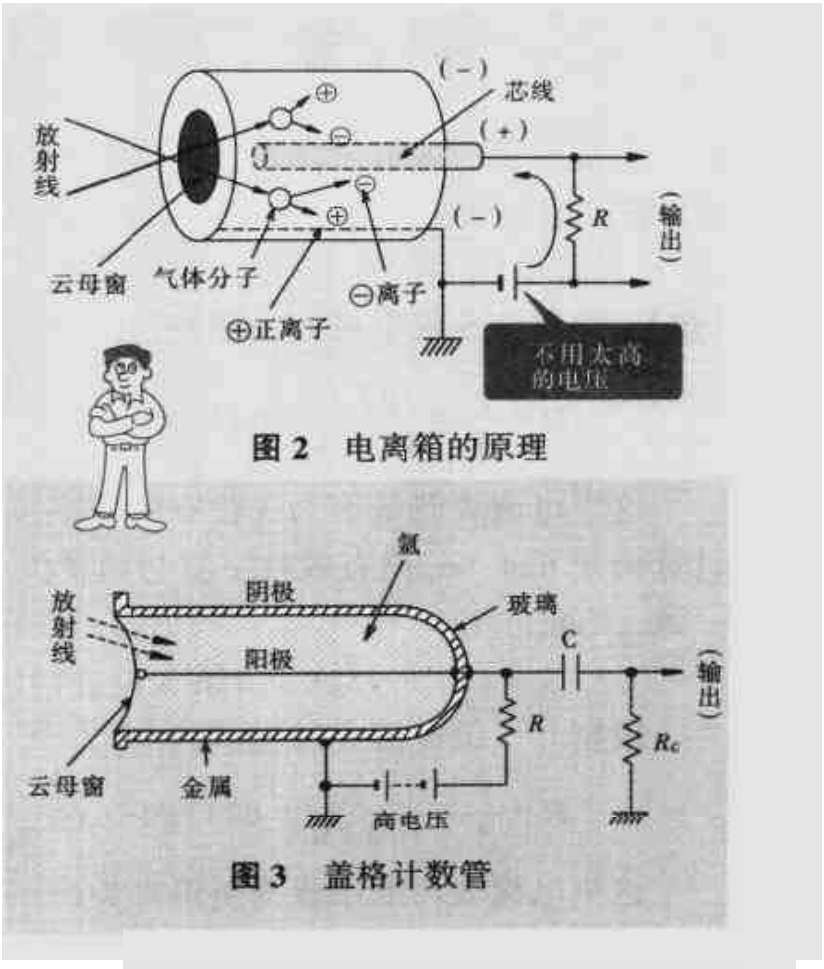


图2　电离箱的原理



图3　盖格计数管

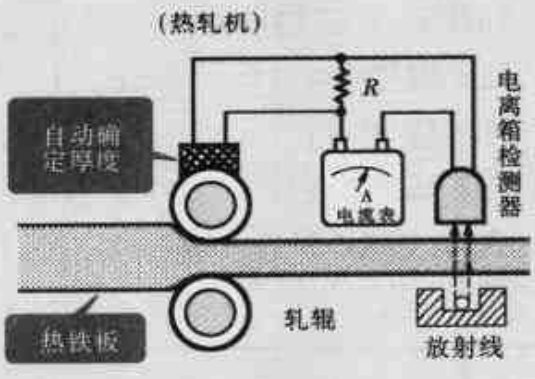
❶ 盖格(GM)计数管

盖格计数管的构造类似于电离箱，管内装入氩等气体。在计数管的电极上加非常高的电压，即使入射的射线很少，也在整个阳极周围产生放电，由于＋离子包围着阳极，所以，有与放射线的强度无关的恒定的放电电流流过。放电电流为脉冲式，脉冲电流进入计数器就可测量射线的强度(图3)。

### 工业测量的应用

测量轧制中的炽热的钢板或制造工程中的乙烯胶等的厚度时，一般的测量仪器要直接与被测物体接触才能测量，因此无法进行测量。

放射线测厚仪不必接触被测物，由于放射线的透过量和散射量随厚度而改变，因此，检测其量多少就可测量被测物体的厚度。右图是透过型测厚仪，可测量轧制中的钢板，它是自动调整热轧机轧制钢板厚度的机构。散射型测厚仪用于测量金属镀层或油漆膜的厚度，另外还用于检查金属管内壁的腐蚀等情况。



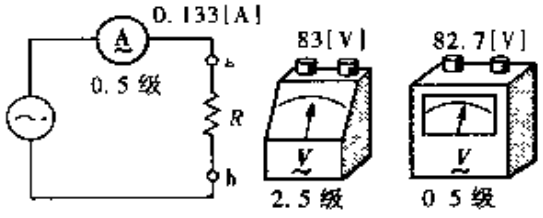
透过式测厚仪与热轧机的自动控制



# 本章小结



**1.** 为加深对有效数字理解，进行如下实验。如图所示那样，试用 2.5 级和 0.5 级的电压表测量电阻两端 $a$、$b$ 的电压。根据电流表和电压表的测量值，试计算电阻 $R$。




【解】 根据 2.5 级电压表的测量值，有

$$R=\frac{V}{A}=\frac{83}{(\quad)_{①}}=624.06\cdots\cdots$$

这里电流表测量值为 3 位有效数字，电压表为（ ）② 位有效数字。计算值是 624.06，但有效数字要与测量仪表最小值一致，因此，

$R=(\quad)_{③}$ [Ω]...（第 3 位进行四舍五入）。

根据 0.5 级电压表的测量值，有

$$R=\frac{V}{A}=\frac{(\quad)_{④}}{0.133}=621.80\cdots\cdots$$

这里电流表与电压表测量值都为（ ）⑤ 位有效数字，因此，

$R=(\quad)_{⑥}$ [Ω]...（第 4 位进行四舍五入）。




**2.** 列举以下的物理量变换为电量的变换器的种类。

(a) 温度→（ ）①，（ ）②

(b) 应变→（ ）③，

(c) 转速→（ ）④ 方式，（ ）⑤ 方式，（ ）⑥ 方式。

**3.** 放射线的穿透力随其种类不同而异，若按穿透力强弱排序，则是（ ）①，（ ）②，（ ）③。

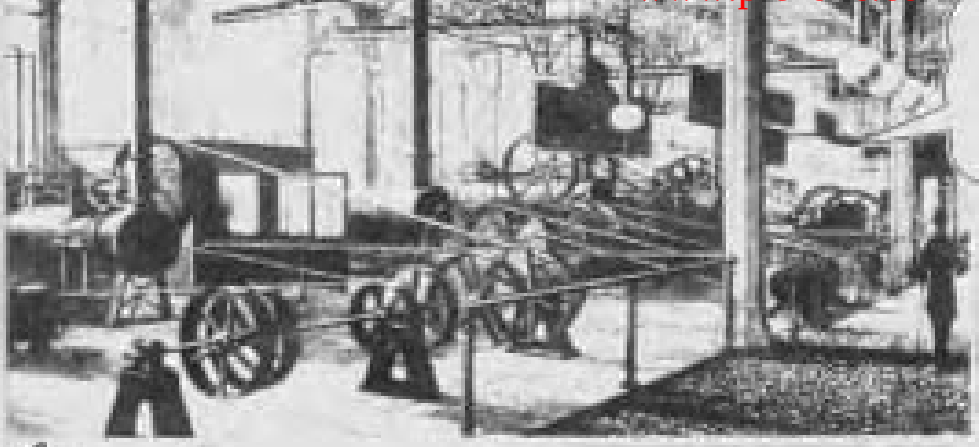
【答案】 1. $(0.133)_{①}$ (2) ② $(62\times10)_{③}$ $(82.7)_{④}$ (3) ⑤ $(622)_{⑥}$

2. (热电偶)① (电阻式温度计)② (应变仪)③ (交流发电)④ (涡流)⑤ (闪光观测器)⑥

3. (γ 射线)① (β 射线)② (α 射线)③



# 8 波形与测量



特斯拉发明的交流异步电机系统







1882 年巴黎国际电气博览会会场的概貌

万国博览会



爱迪生发电机采用电动机系统的拆乳装置



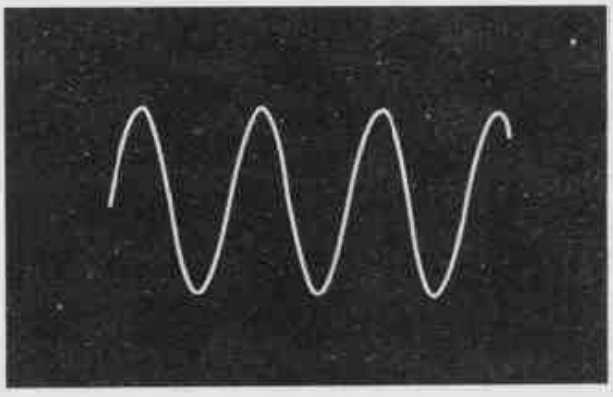


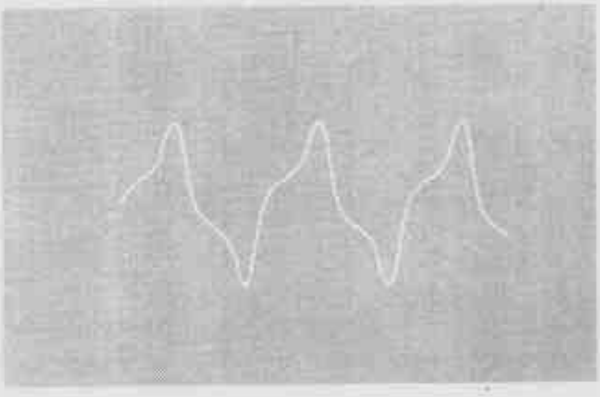
巴黎国际电气博览会上西门子公司的展品

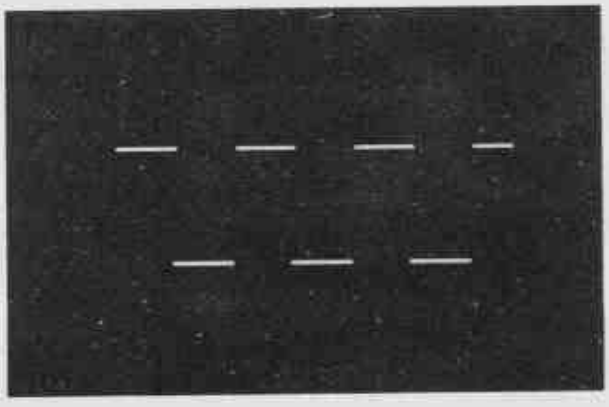
# 本章要点及学习方法




本章前半部分涉及交流电的典型波形，后半部分介绍测量的部分内容。所说波形包括从不应当含有失真的波形（纯正弦波形）到通过有意产生失真而形成的特殊波形，它们具有多种多样的形态。这些波形不仅在测量中应用，而且还应用于家用电视机、自动控制以及计算机等。只要稍微注意一下，在我们周围就可以看到很多波形应用方面的例子。另外，随着人们生活的提高，也需要进行更高精度的测量。然而，说到测量，就要讨论测量以什么为基准，测量的量值有什么意义，这是很难说清的问题。另外，对测量的量值进行高超的处理，利用其结果，这就是测量的意义。

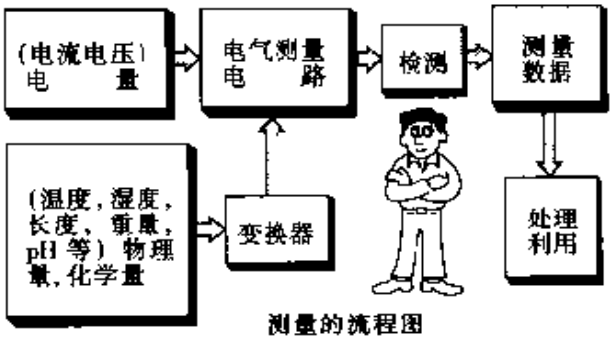




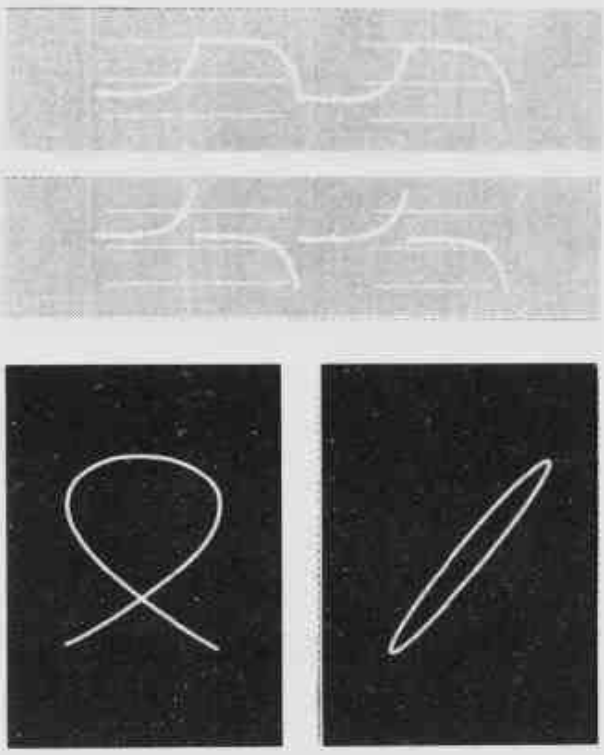


电测原本是测量电压与电流那样形式的电量，但也能将长度、重量、温度、湿度等物理量变换为电量进行测量。近年来，在测量方面也使用微处理器式测量仪表。由此减少

人为误差，提高测量精度，同时也能快速进行记录与结果的处理。学习本章后，希望这些学习方法今后能为自己所用。



测量的流程图

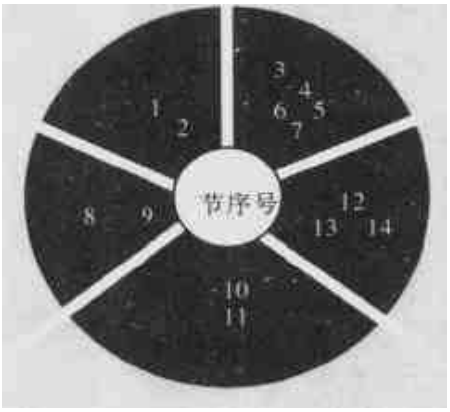


## 本章要学习的内容

正弦波是什么样的波形呢？失真波又是什么样的波形呢？研究这些内容。

脉冲是什么样的波形呢？它有何种作用呢？脉冲加在 *CR*，*LR* 电路中会怎样呢？

观察波形时“有效功率”代表什么呢？学习部分使用方法。

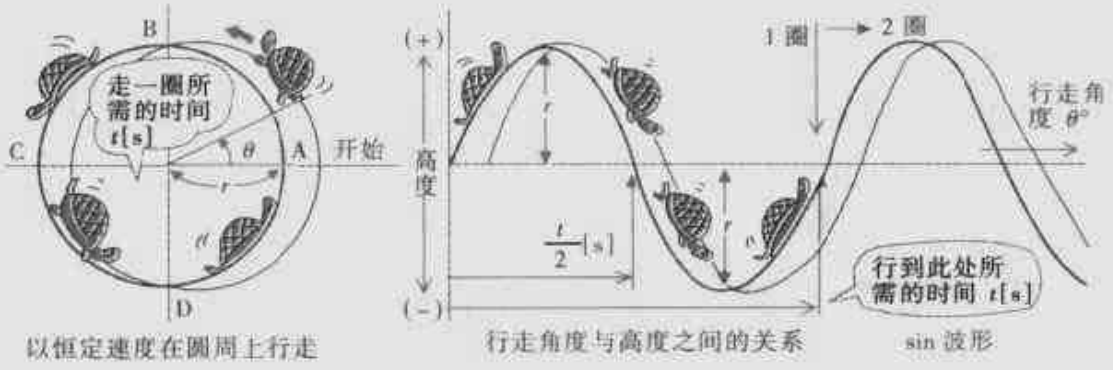



电子测量仪表有哪些呢？*C*，*L*，*f*，*V* 等的测量都使用哪些仪表呢？学习这些有关内容。



周期与时间是兄弟关系，时间测量与周期测量一样，除秒表以外还有什么样的测量仪表呢？

# 1 正弦波




## 何谓正弦波

考虑本节开头插图那样的圆，以这个圆周上的 A 点作为出发点，沿反时针方向以恒定速度行走看看。观察一下这时中心角度 $\theta$°与高度（以 AC 轴为基准），这个角度与高度之间关系如插图的右边所示。这种波形叫做**正弦波**。另外，沿着圆周走一圈所需的时间设为 $t$ 秒，则横轴作为**时间轴**也没有任何变化。

## 正弦波与余弦波

若图 1 中的半径为 $r$(m)，则高度为 $r\sin\theta$。因此，像插图那样的波形叫做**正弦波**。若其出发点如图 2 所示那样改为 B 点，波形就变成如图 3 所示。这种波形高度为 $r\cos\theta$，因而，这样的波形称为**余弦波**。由于这种波形的出发点比正弦波提前 90°，所以（其相位）就比正弦波超前 90°，由此可知，正弦波与余弦波只是出发点不同。

另外，以 C 或 D 作为出发点，波形基本上是不变的。这些波形都称为**正弦波**，人们家庭用电的波形都是近似正弦波。

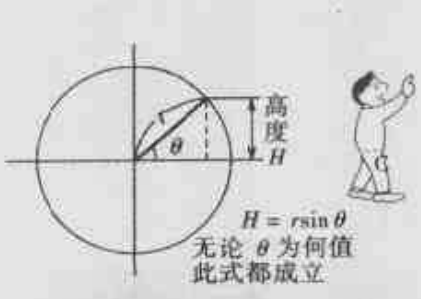



图 1 角度和高度之间的关系

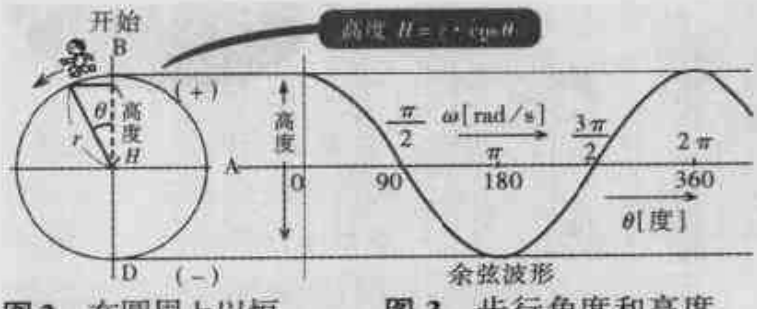



图 2 在圆周上以恒定速度行走

图 3 步行角度和高度之间的关系

## 旋转与周期

在图 4 中，从出发点 A 通过 B、C、D 各点再返回到 A 点的过程称为一圈。其波形从 0°到 360°之间改变着。这个时间就是 **1 个周期**。1 个周期需要的时间设为 $T$(s)，则 $1/T$ 用**频率**（1 秒时间内重复的次数）$f$(Hz) 来表示。机械转动 1 圈与 1 个周期(电气上转动一圈)未必相等。

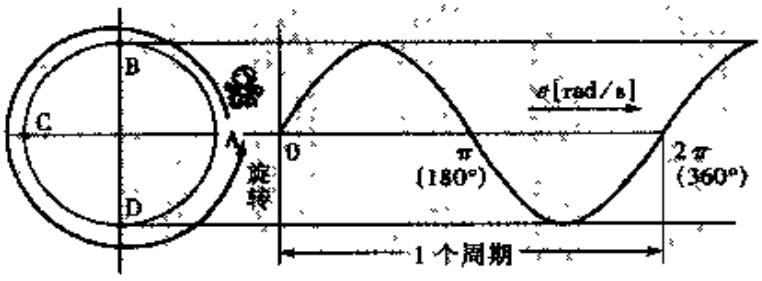



**图 4　旋转与周期之间的关系**

请研究一下这个问题，电气上如图 5(a) 所示那样，从 N 极出发通过 S 极再返回到 N 极称为 1 个周期。这与机械转动一圈是一致的。而对于图 5(b)则是从 $N_1$ 极出发通过 $S_1$、$N_2$ 和 $S_2$ 极再返回到 $N_1$ 极，机械上仍是转动了 1 圈，但电气上却是转动 2 圈，即为 2 个周期。这种关系与磁极对数成正比。

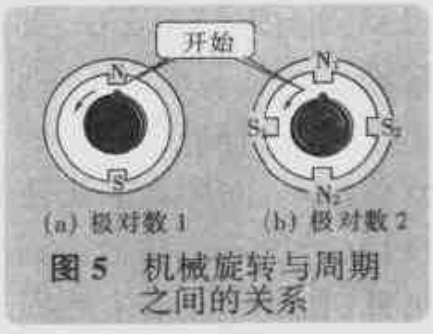
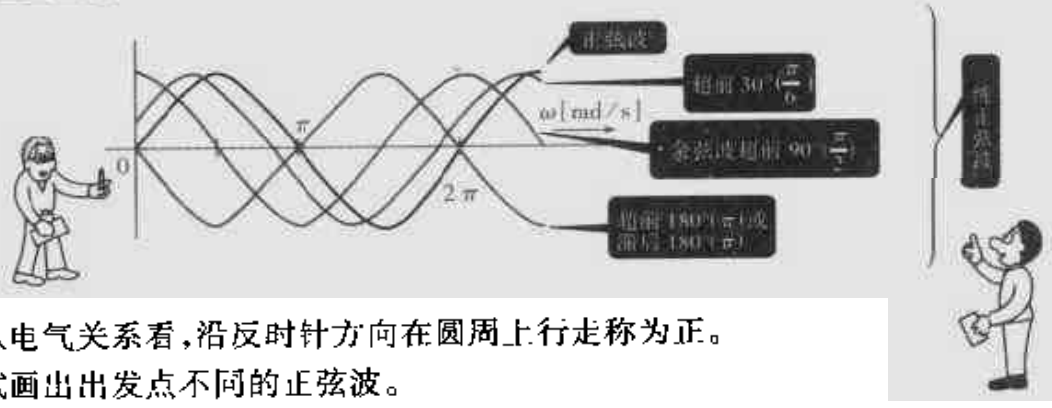



**图 5　机械旋转与周期之间的关系**

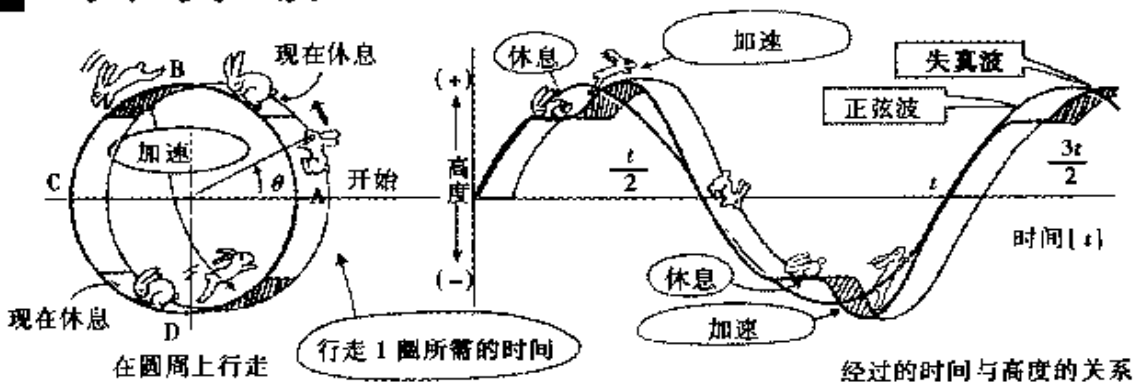
Let's try

### 研究一下各种正弦波




1. 从电气关系看，沿反时针方向在圆周上行走称为正。
2. 试画出出发点不同的正弦波。
3. 日本关东地区的交流电频率为 50[Hz]，关西地区为 60[Hz]。各地区交流电的 1 个周期需要的时间各是多少秒呢？ **【答案】** 关东地区为 20ms，关西为 16.7ms。
4. 有关弧度法和瞬时值请参看 160 页。
5. 有关最大值、有效值和平均值请参看 164 页。

# 2 失真波




## 何谓失真波

在真正圆形的圆周上以恒定速度行走时，中心角与高度的关系由作图可知为正弦波。现在，如插图所示那样，行走 1 周的时间为 $t$ 秒，如果在中途停下休息两次，这时坚持要加速以补上滞后时间的话，如插图的右图所示那样，这种波形就不能称为正弦波。这样，虽然以恒定周期变化，但不是正弦波形，而称为**非正弦波**或**失真波**。图 1 示出非正弦波的实例。特别是图 (a)，(b) 所示的波形可当作是失真波 (c)，(d) 和 (e) 等的脉冲的同类波形。另外，如图 (a) 所示那样，对称于横轴的波形称为**对称波**，如图 (b) 所示那样，不对称的称为**非对称波**。人们用的交流电几乎都是失真波。

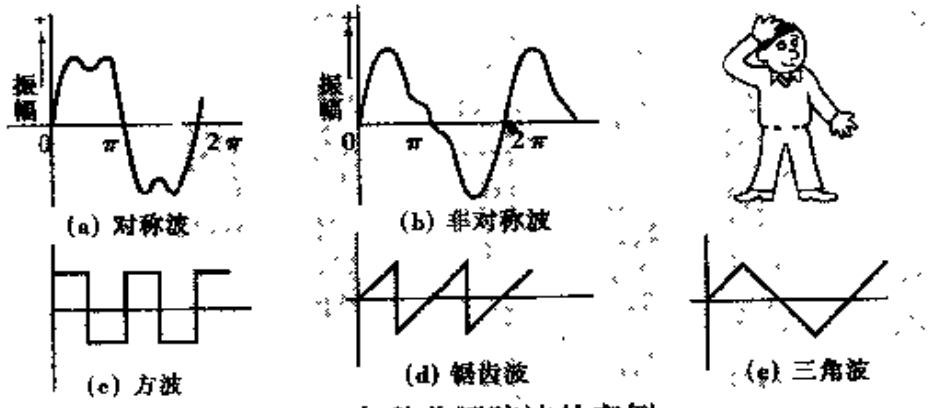



**图 1　各种非正弦波的实例**

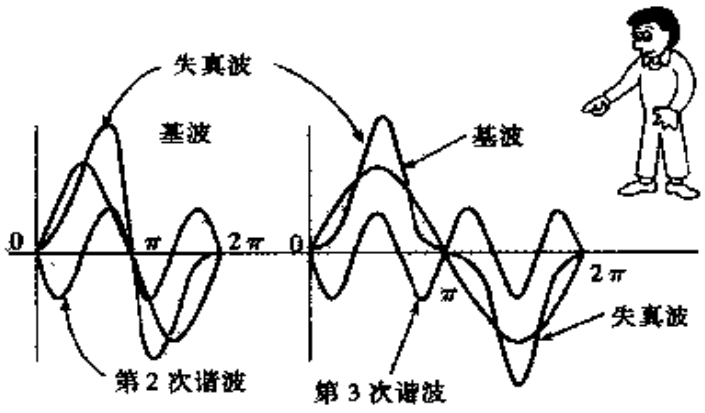
## 试对失真波进行分解

用傅里叶级数展开来分解失真波是最好的方法，但比较麻烦，因此，改用其它方法。这里不进行分解，试对各种正弦波进行合成而构成失真波，如



图 2 所示。有时直流成分也叠加在上面。与失真波周期(频率)相同的正弦波称为**基波**，2 倍基波频率的波形称为 **2 次谐波**，3 倍基波频率的波形称为 **3 次谐波**等等。

由图 2 可知，失真波可分解为直流成分与各种频率的正弦波成分。




(a) 基波与第 2 次谐波的合成　(b) 基波与第 3 次谐波的合成

**图 2　基波与高次谐波的合成**

## 一般的处理方法

波形失真少或者有失真但其影响较小时，一般处理方法与正弦波相同，失真影响较大时，一定要把波形中的直流成分直到高次谐波成分都计算在内。由于在人们的日常生活中，不允许出现失真的场合是很多的，所以在使用中要尽可能地排除失真。对于正弦波如何表示失真呢？这就要用**失真度**。

$$\text{失真度} = \frac{\text{高次谐波总的有效值}}{\text{基波有效值}} \times 100\ [\%]$$



One point　一般来说，不是圆滑的正弦波形称为失真波。矩形波不能称为失真波。



Entry

### 失真波学习小结

除基波以外的波形都称为高次谐波。有 2 次谐波，3 次谐波……到无穷次谐波。仅含奇次谐波的失真波称为对称波，含有偶次谐波与直流成分的失真波称为非对称波，如果波形的正负面积相等，就不含有直流成分。

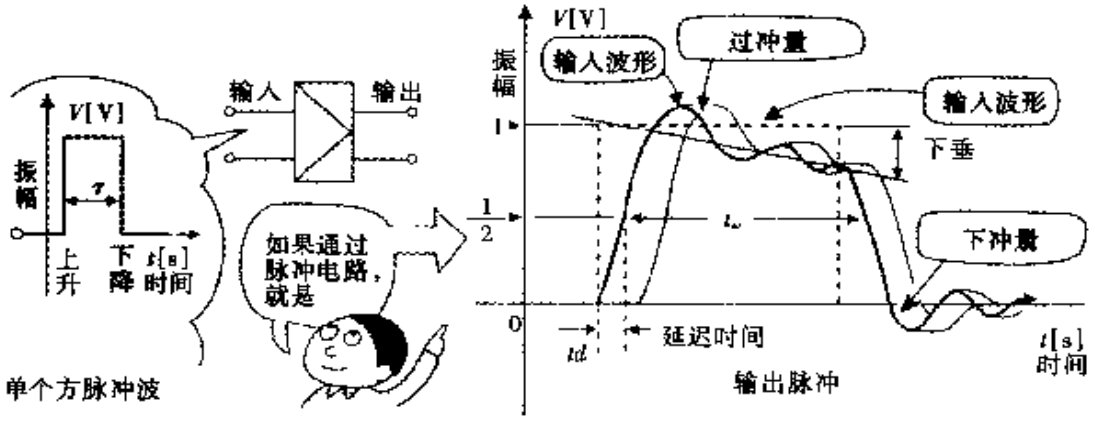
❶ 机械转动速度不匀是导致电气失真的原因。

❷ 各种正弦波进行合成就构成失真波。

❸ 傅里叶(Fourier：1768～1830)是法国数学家和物理学家，他提出任何函数都可以考虑在一个区间中用三角函数的级数来表示。



# 3 脉冲波




## 何谓脉冲波



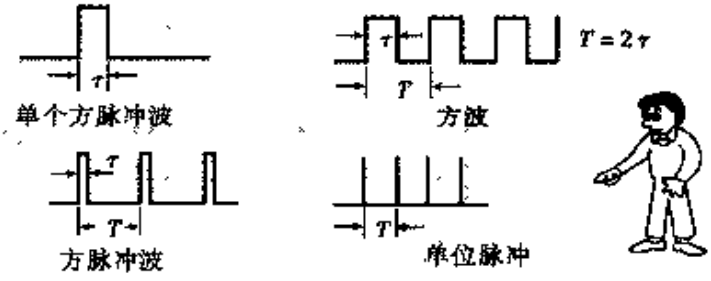





**图 1　各种脉冲波**

脉冲波是非正弦波的同类波形，一般是持续时间短，初始值与终值相等那样的波形，广义上也有称所有特殊波形为非正弦波的情况。其代表波形如图 1 所示。我们的脉搏与心电图都是脉冲的同类波形。如图 1 所示的 $T = 2\tau$ 那样的波形称为**方波**，$T$[s] 为**重复周期**，$1/T$(Hz) 称为**重复频率**。若观察一下脉冲波，实际上不能产生图 1 所示那样的波形，波形如图 2 所示。振幅最大值设为"1"，对应于振幅一半的两点之间的宽度称为**脉冲宽度**，用 $t_w$(s)表示。另外，上升时间是从振幅 0.1 变到 0.9 的时间 $t_r$(s)，同样，也可定义下降时间 $t_f$(s)。$1/t_w$ [Hz]称为**特征频率**，$t_w/T$ 称为**冲击系数**。脉冲波通过电路时波形有时变为如本节开始插图所示那样。这时的 $t_d$(s)称为**脉冲延迟时间**。

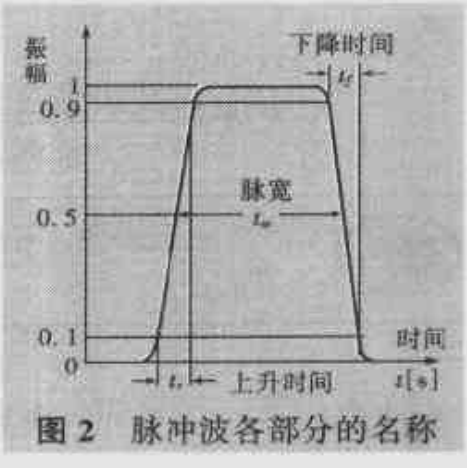
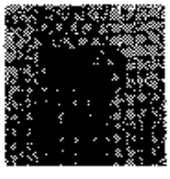



**图 2　脉冲波各部分的名称**

One point　一般来说，脉冲波是波形变化急剧的波形，只在极短时间内存在。



## 试产生脉冲波

对于图 3 所示电路，开关 S 按一定速度接通/断开时，电压表指针的偏转与时间的关系如图 4 所示，即产生脉冲波。实际上，用半导体器件实现开关功能，处理脉冲波的电路则称为脉冲电路。

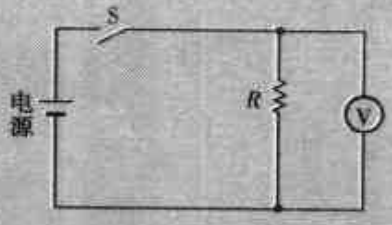



图 3　脉冲产生电路

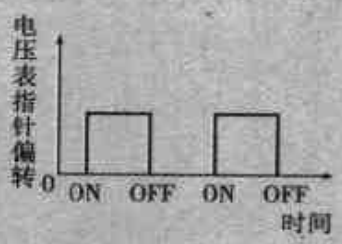



图 4　电压表指针的摆动

## 脉冲波的用途

按用途分类的脉冲波大致如表 1 所示，如果数起来脉冲波的应用有很多。我们接触最多的是钟表，脉冲波应用于各个方面。脉冲波中也含有相当多的高次谐波。脉冲波也有不利之处，即产生干扰。作为干扰一例就是电磁波干扰，例如，雷电进入收音机就会有“卡啦卡啦”的声音。

表 1　脉冲波应用领域

| | |
|---|---|
| 测量领域 | 示波器<br>数字式测量仪表<br>鱼群探测器<br>$NO_x$ 测量显示等 |
| 控制领域 | 电子计算机，计算机<br>卫星控制，电车，<br>发电厂等 |
| 通信领域 | 电视广播，雷达，电报等。 |
| 其它医疗领域等 | |

Let's try

### 试产生脉冲波

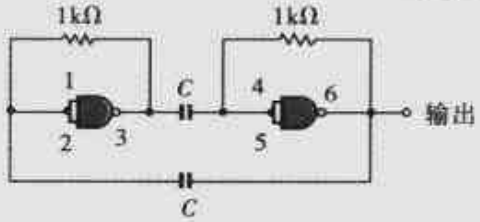





14 脚 +5(V)
7 脚 地

74LS00 的引脚号

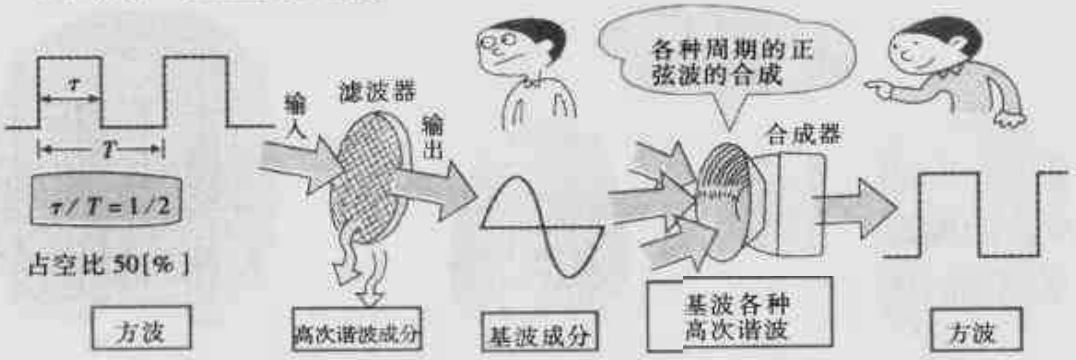





由 C 改变频率
用 TTL 构成无稳态多谐振荡器

用同步示波器观察到什么样的波形呢？把正在工作的振荡器靠近收音机看看，会怎么样呢？正在工作的计算器也一样，请靠近收音机看看，就有噪声进入收音机。

# 4 方波与正弦波




## 何谓方波

在脉冲波一节中对此有过介绍，方波是特殊的脉冲波，如图 1 所示，重复周期是脉宽的 2 倍，它是一种方波波形。因此，图 2 所示的波形也是脉冲波的同类波形，但不叫做方波。分别叫做**微分脉冲**，**积分脉冲**等。把 $\tau/T=1/2$ 称为**占空比**(脉冲宽度/周期)，等于 50% 或 1:1 等。

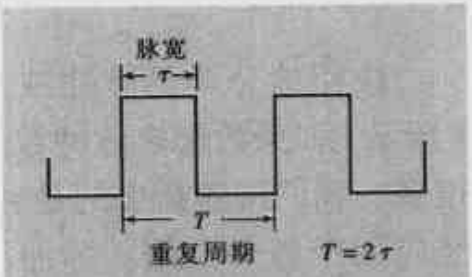



图 1 方波

## 正弦波变为方波

就方波与正弦波的关系来说，方波就是直流成分与周期(频率)不同的若干种正弦波(基波与奇数高次谐波)的集合。

图 3 示出基波与高次谐波的合成波形。人们认为若再加上高次正弦波，就明显地接近方波。另外，为求出方波的高次谐波分量，可以求解微分方程式，或者用傅里叶级数进行展开。

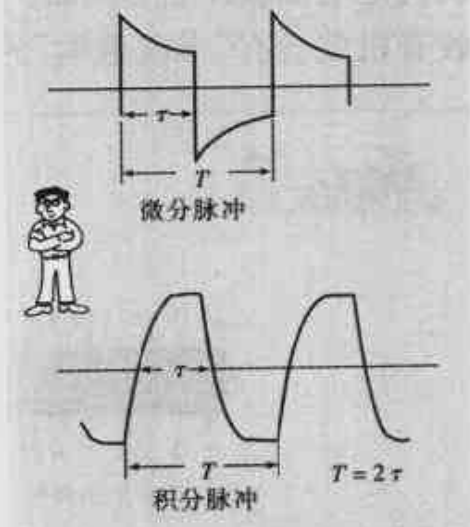
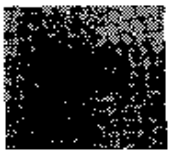



图 2 微分脉冲，积分脉冲

## 方波的处理

处理方波的电路也称为脉冲电路。方波与脉冲波一样，具有如图 4(b)所示的各种波形，一般来说，即使波形稍微有些散乱，但在多数情况下是不



会有问题的。方波也含有高次谐波分量，许多情况下，从脉冲电路中辐射出电磁波，**干扰**其它通信设备等。在处理脉冲波与其它失真波时要特别注意这个问题。另外，方波经常作为各种脉冲波的原始波形，还应用于人们使用的计算器中。方波除掉棱角就变成了正弦波，但一般采用高次谐波较少的**三角波**。还有，周期是脉冲宽度的 2 倍，方形的脉冲波称为方波。

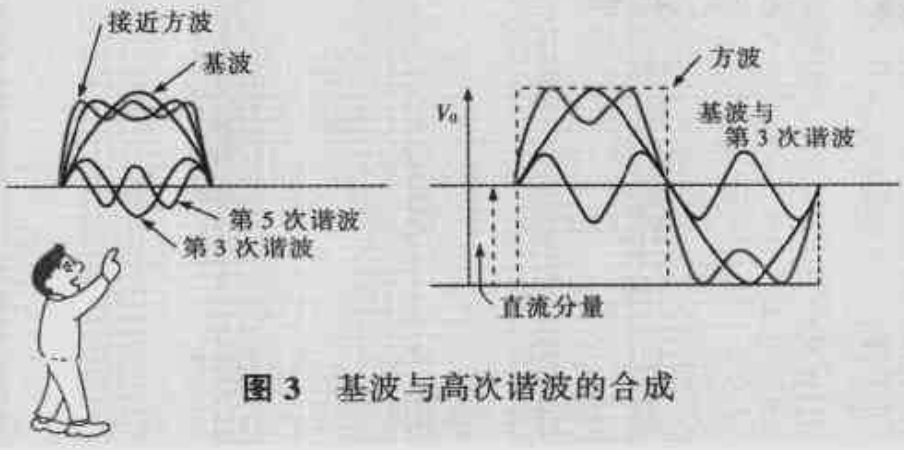



图 3　基波与高次谐波的合成

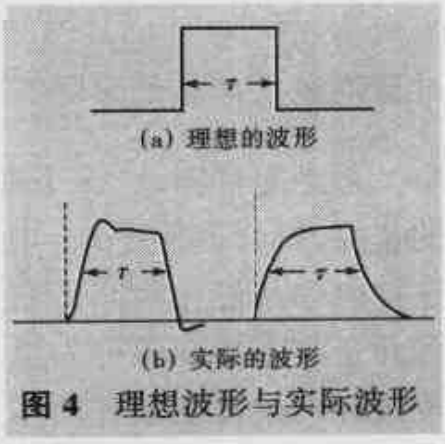



图 4　理想波形与实际波形

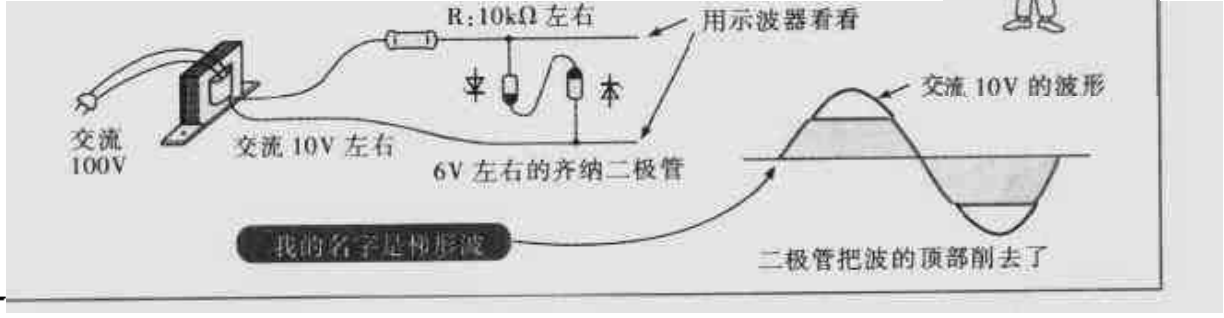



### 试求放大方波时的带宽

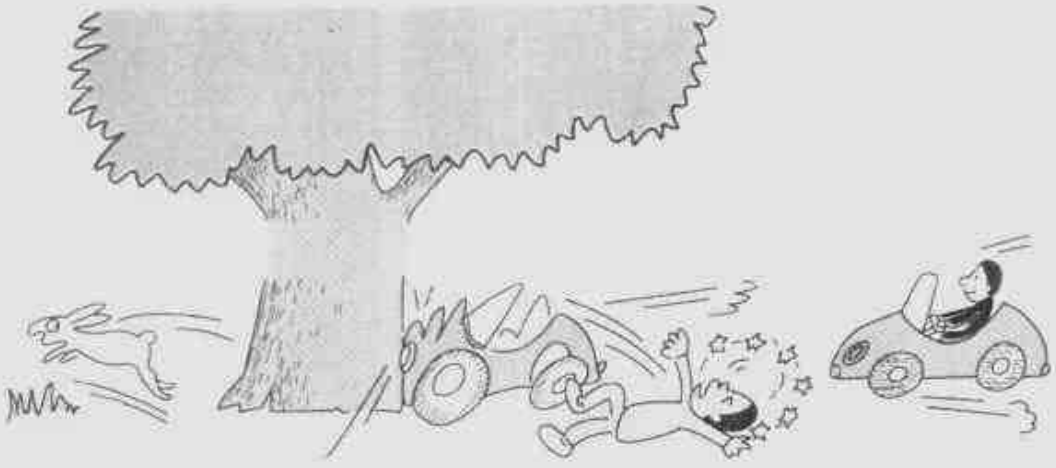
试求放大 $T=1(\mu s)$ 方波时所需的带宽（考虑到第 10 次谐波）。基波的频率为 1[MHz]。那么，带宽为直流 ~ 10[MHz]。一般来说，若是达到高次谐波次数为 10 ~ 20 左右的带宽，就可以达到实用。脉冲电路有时施加屏蔽，以免产生电磁波干扰。

那么，试制作产生类似方波的电路。





# 5 过渡现象



过渡现象是怎么回事呢?

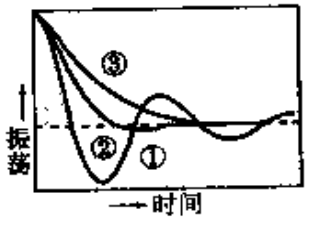
乘坐电梯时,一按下所到楼层的按钮,关好门电梯就开始运行。到达目的楼层,电梯就停下来。电梯开始运行与停止时,就有一种受冲击的感觉。这种电梯从静止状态转变到按一定速度运行,或者从按一定速度运行转变到静止状态的现象称为**过渡现象**。若想想乘坐交通工具时的感觉,就会发现这样的过渡现象有很多。

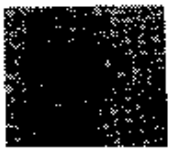
这是怎么回事呢?原因是物体具有质量,因为有质量,停止的电梯到达按一定速度运行需要时间(从按一定速度运行的电梯到停下来也是一样),需要时间就产生过渡现象。

看看电路是怎样的呢?在电路中,**电路参数**($R$, $L$, $C$)是变化的,若输入变化,则与此相对应的电路内电流与电压也发生变化,结果是状态稳定在某一定值。电路中若只有电阻(消耗能量的元件),不会有什么问题,但对于具有电容 $C$ 和电感 $L$ 的电路,能量($1/2\,CV^2$, $1/2\,LI^2$ [J])被积蓄起来,因此,状态的过渡需要时间。也就是说,从变化前到变化后有时间延迟,也产生过渡现象。这里,稳定在一定值的状态称为**稳态**。

One point

人们想,在右图中看到的是某种曲线。是的,图中表示检流计阻尼状态的曲线,①的状态称为欠阻尼,②的状态称为临界阻尼,③的状态称为过阻尼。这也是一种过渡现象。



## 有关 *RC* 电路

让我们考察向 *RC* 电路中施加电压的情形，这个电路如图 1 所示。看看开关 S 扳向“a”侧时的电流变化，由此可知变化情况如图 2 所示。原因是电容的特性带来的，即电容充满电荷后，就无电流流通。另外，我们认为，$V_C$ 和 $V_R$ 的变化如图 3 所示。再看看电容中蓄积电荷的放电情况是怎么样呢？这个电路如图 4 所示。我们认为很明显，电流变化如图 5 所示。电流方向变“－”，这是因为施加电压时电流为“＋”的缘故。由此可知 $V_C$ 和 $V_R$ 的变化情况如图 6 所示。*LR* 电路也呈现出同样现象。

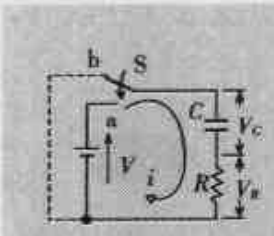



图 1　施加电压时（充电的情况）




图 2　电流的变化

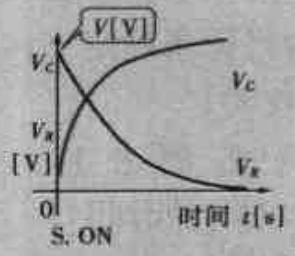



图 3　$V_C$，$V_R$ 的变化

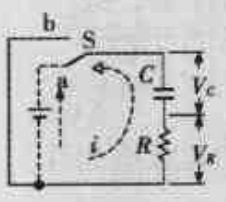



图 4　放电的情况

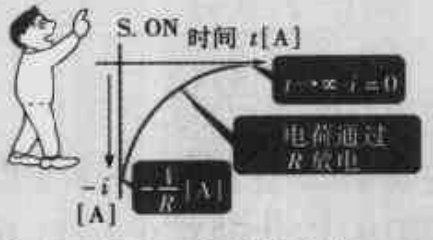



图 5　电流的变化

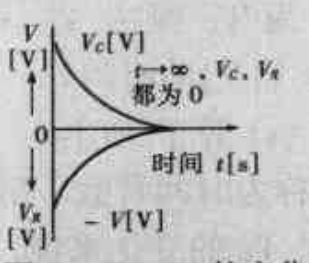
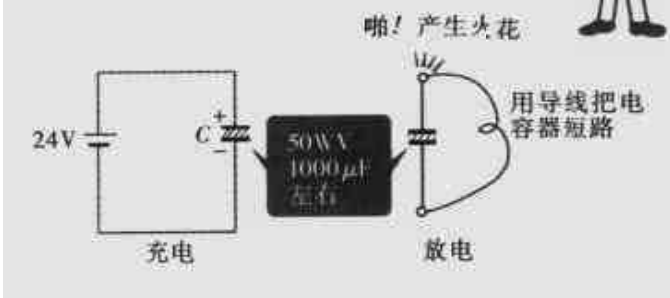



图 6　$V_C$，$V_R$ 的变化

### 电容器积蓄能量



电容器充满电荷时用导线把电容器两端短路试试看，就会产生火花。这就是电容中积蓄的 $1/2\,CV^2$ 能量的释放。






## 6 时间常数




### *RC* 电路中的时间常数

*RC* 电路的过渡现象的曲线如图 1 所示。这里，以表示 $V_C$(或 $V_R$)的变化速率为目标来确定 $t_1$(s)时间。

【充电时】

$t_1$ 为 $V_C$ 到达 $V_C = 0.632 \times V$[V]的时间

【放电时】

$t_1$ 为 $V_C$ 到达 $V_C = 0.368 \times V$[V]的时间。

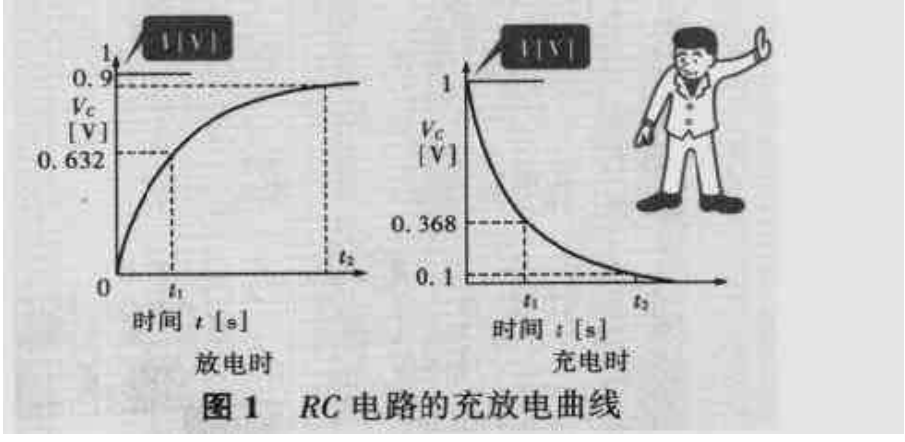



图 1　*RC* 电路的充放电曲线

$t_1$ (s) 等于 *RC*[s]。*RC*[s] 称为时间常数。另外，对于 $V_C$ 的变化来说，充电时 $V_C$ 达到 $0.9 \times V$[V]的时间、放电时 $V_C$ 达到 $0.1 \times V$[V]的时间为 $t_2$ (s)，即以 $2.3 \times t_1 = 2.3 \times C \cdot R$[s]，作为过渡过程结束的大致目标。考虑脉冲电路时，$t_1$ 和 $t_2$ 都要计算。

### *LR* 电路的时间常数

*LR* 电路也与 *RC* 电路一样，也具有过渡现象，因此，作为变化速度的目标仍是确定时间常数。与在 *RC* 电路中所见到的电压变化相比较，考虑 *LR* 电路中的电流变化。过渡现象的曲线如图 2 所示。这两根曲线是对称于 $i/2$ 的。对于时间常数，采用与 *RC* 电路同样的考虑方法。



【充电时】

时间常数为电流上升到 $i = 0.632 \times$(稳态电流)所需的时间。



[放电时]

时间常数为电流下降到稳态电流的 0.368 倍所需的时间。$t_1$[s]等于 $L/R$[s]。$L/R$[s] 称为 $LR$ 电路的时间常数。对于 $LR$ 电路，时间常数不能取得较大(因为要得到较大 $L$，线圈就要比较大，这不实用)，一般使用 $RC$ 电路。

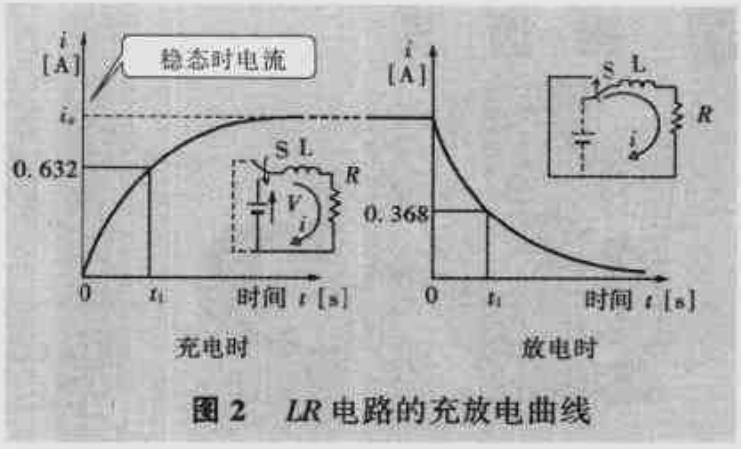



图 2　$LR$ 电路的充放电曲线

## 向 $RC$ 电路施加方波脉冲

图 3 中示出了多种 $V_C$、$V_R$ 随 $\tau$ 与 $RC$ 而变化的关系。这都是用于产生脉冲波的。

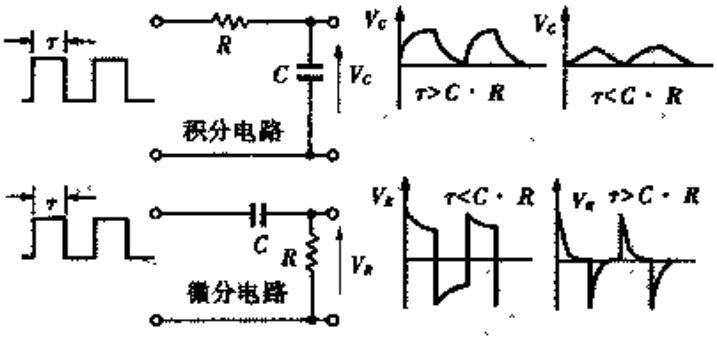
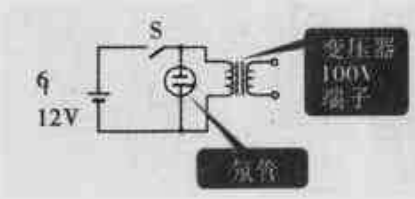
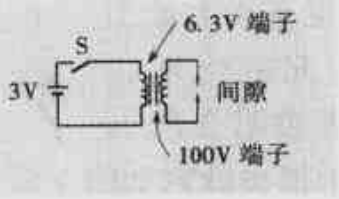



图 3　$\tau$ 与 $R$、$C$ 的关系

One point　电容与电阻电路的时间常数为 $RC$ [s]，电感与电阻电路的时间常为 $L/R$ [s]。

Let's try　试做一个实验，验证电感线圈中也积蓄能量。

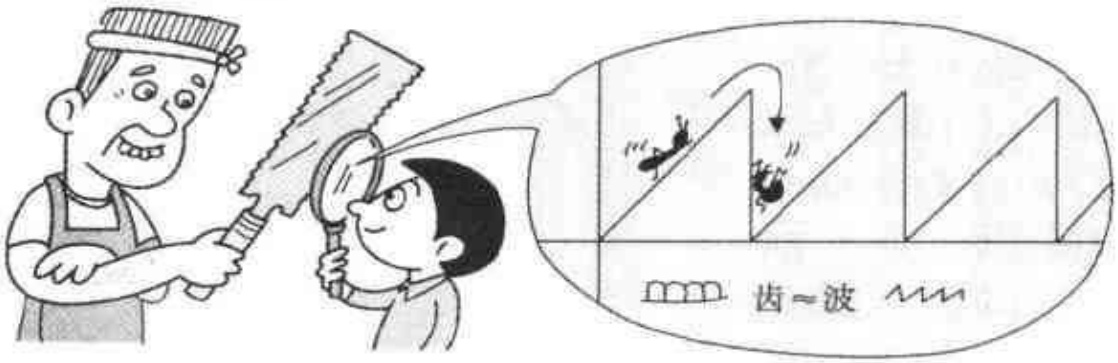



看看图中开关 S 接通/断开的情况，S 断开时，氖灯亮，这是由于 $L$ 中积蓄能量的缘故。S 在接通与断开两种状态之间来回切换时，在间隙处产生火花。



# 7 锯齿波




## 锯齿波是什么样的波形

所谓锯齿波是如图 1 所示那样的类似锯齿的波形。这也是一种非正弦波，有时也视为脉冲同类波形。因此，若按傅里叶级数展开，也是直流分量与基波分量以及高次谐波分量的集合。这种波形也称为**扫描波形**，定义如下：

[ $T_S$：扫描时间 [s]，$T_B$：回扫时间 [s]
$T$：重复周期 [s]，$f$：$1/T$ 重复频率 [Hz] ]

一般来说，与 $T_S$ 相比，$T_B$ 越短越好，但 $T_B$ 难以达到 0。$T_B/T_S$ 为百分之几到百分之十几。

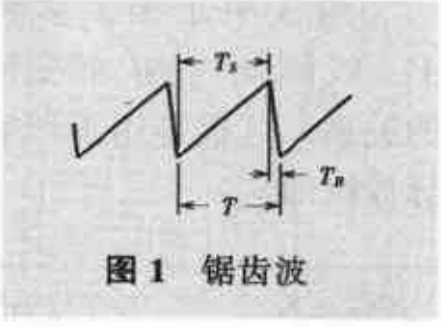



图 1 锯齿波

## 锯齿波的产生

可以使用**线性集成电路**产生锯齿波，但这里基本上是使用 $RC$ 充放电电路。电路如图 2 所示，产生的锯齿波形如图 3 所示。

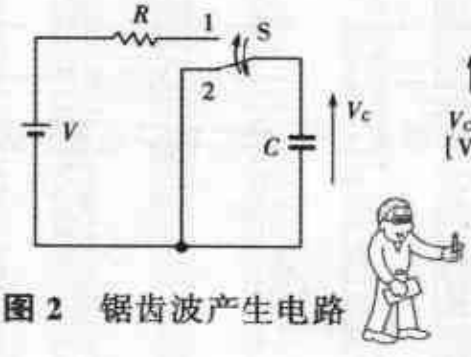



图 2 锯齿波产生电路

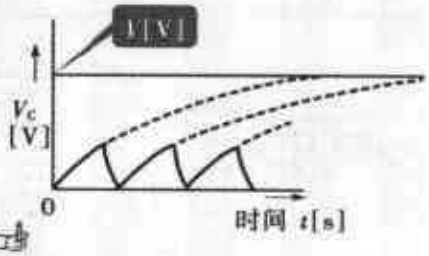



图 3 产生的波形

[ 开关 S 扳向 1 侧，$C$ 两端电压逐渐上升，若就这样不动，上升的电压波形应如图 3 中虚线所示，但在某个时刻把 S 转向 2 侧，电容器迅速放电，随即 S 又转向 1 侧，电容器再次充电，两端电压再次逐渐上升，这样电容器反复充放电即产生锯齿波。 ]



若周期性地切换开关，就产生锯齿波。一般来说，使用晶体管等来取代这个开关，波形周期由充电电路的时间常数（$CR$）决定。

### 锯齿波的利用

在电学测量方面经常使用的不是锯齿波而是脉冲波。这里试述利用锯齿波的典型实例。生活中的电视机里用到锯齿波。有关电视机的详细原理可参考有关参考书籍，基本原理是使**电子束**在水平与垂直方向上偏转（称为扫描），偏转的电子束碰到荧光屏就变成光点而成像。为使电子束偏转就要使用锯齿波。因此，若这种锯齿波的样子很散乱，将会如何呢？结果会在画面上表现出来。即画面的尺寸时而缩小，时而上下折叠。另外，为了使观察波形的**示波器**的电子束在水平方向上偏转，也利用锯齿波。

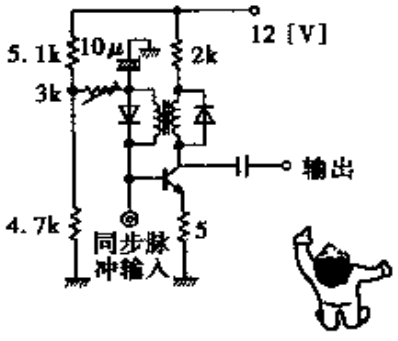



**图 4　电视机垂直振荡电路（间歇振荡器）**

以上学习的有关波形的典型代表，特别是脉冲类波形，以及简单产生的方法归纳如表 1。

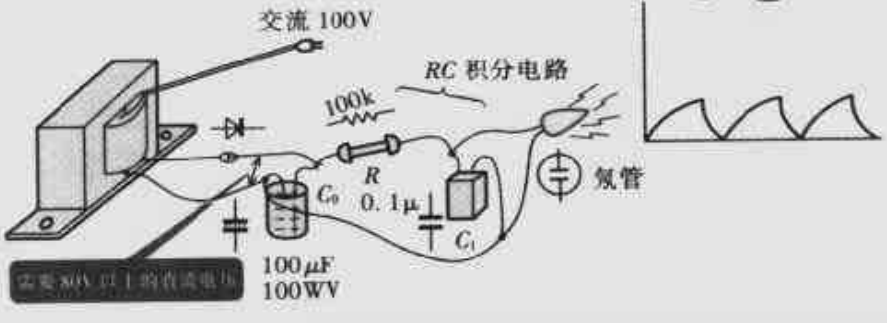
**表 1　波形的产生方法**

正弦波——$RC$ 振荡，$LC$ 振荡　　方波——无稳态多谐振荡器
锯齿波——氖灯管振荡、间隙振荡、无稳态多谐振荡器

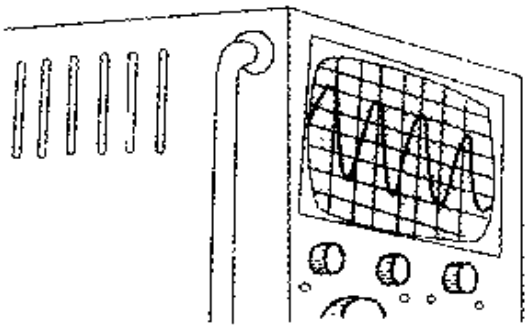
Let's try

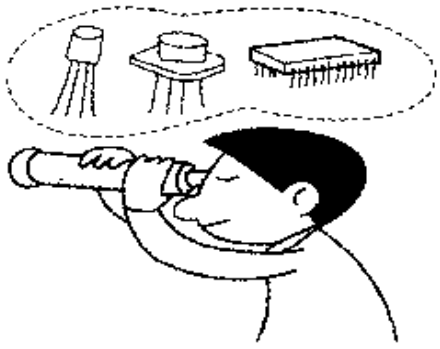
#### 试产生锯齿波

试用示波器观察如图所示的氖灯管的端电压。看看当 $C_1$、$R$ 为不同值时波形有什么变化。



# 8 示波器的原理





## 关于示波器

试研究测量与观察随时间而变化的电学量的方法。

这些方法有描笔式示波器、电磁式示波器与**电子示波器**等几种。

这些示波器的性能如表 1 所示。

表 1　示波器的性能

| | |
|---|---|
| 描笔式示波器 | 描笔偏转幅度为几[mV/cm]～几百[V/cm]，频率为 100[Hz]左右 |
| 电磁式示波器 | 光的偏转幅度为几[μA/mm]～几[mA/mm]，频率为几[kHz]左右 |
| 电子示波器 | 电子束偏转幅度为几[mV/cm]～几百[V/cm]，频率为几十[MHz]左右 |

* 电磁式示波器是使用机械振子，限于几千赫以下的低频的测量，阴极射线管示波器利用电子束的偏转，测量频率范围可达几十 MHz。

## 示波器的组成框图

由于布劳恩的发明而制成了阴极射线管（布劳恩管），也就制造出与家中电视机一样便于使用的示波器。示波器随用途不同有各种形式，如**电子示波器**、同步示波器、采样示波器、*XY* 示波器等。然而，在阴极射线管

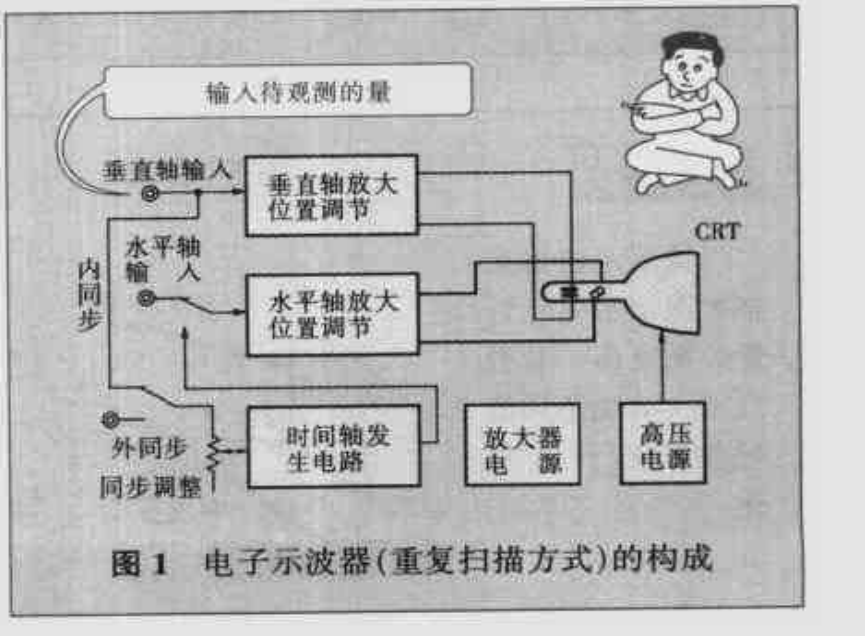



图 1　电子示波器(重复扫描方式)的构成

上显示的原理是相同的。电子示波器(重复扫描方式)的组成框图如图 1 所示。



## 各部分的工作原理

在阴极射线管上显示波形的各部分的工作原理如下：

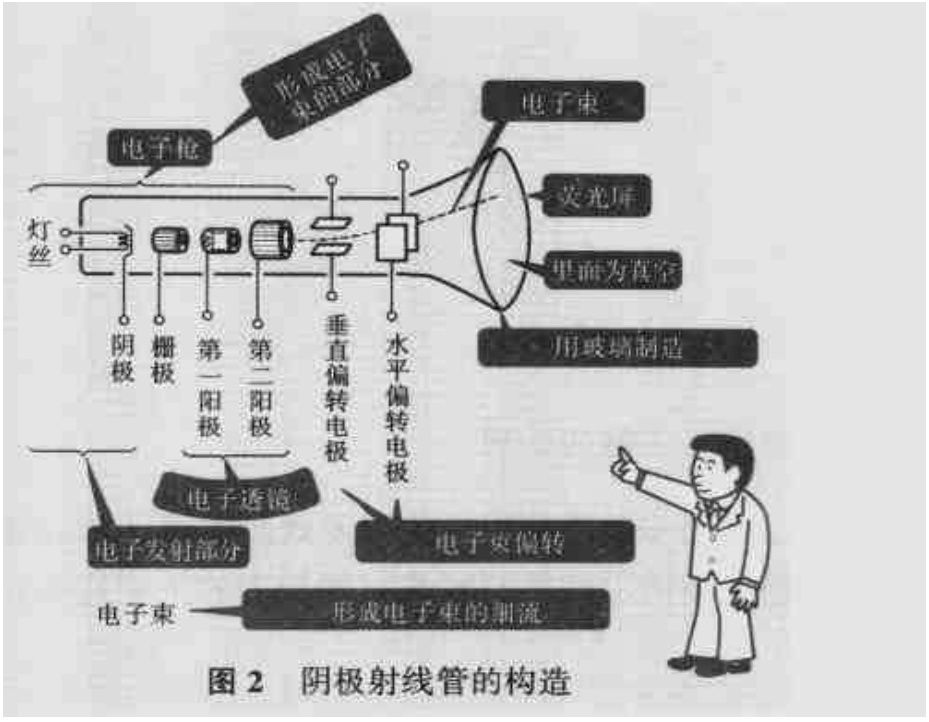


图 2　阴极射线管的构造

Ⓐ**阴极射线管**　相当于输出部分，显示波形。图 2 示出其结构。从阴极发射的**电子**经过栅极、第 1 阳极、第 2 阳极形式**电子束**。经过垂直与水平偏转到达荧光屏上形成光点，其残留的轨迹进入人们的眼中。

Ⓑ**垂直放大器**　若输入信号较小，则电子束就不能垂直偏转，因此，需要用垂直放大器来放大输入信号。

Ⓒ**水平放大器**　设计目的与垂直放大器相同。

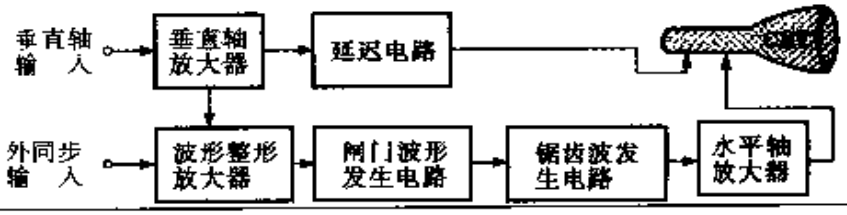
Ⓓ**时间轴发生器**　产生光点**扫描**的波形，使电子束随时间作水平移动。这个动作每隔一定时间进行一次，因此，称为**时间轴**，此**电**压使用**锯齿波**。电子示波器的早期产品必须通过手动调整来实现同步(就是使阴极射线管上显示的波形稳定)，但现在已普遍使用自动同步的同步示波器。



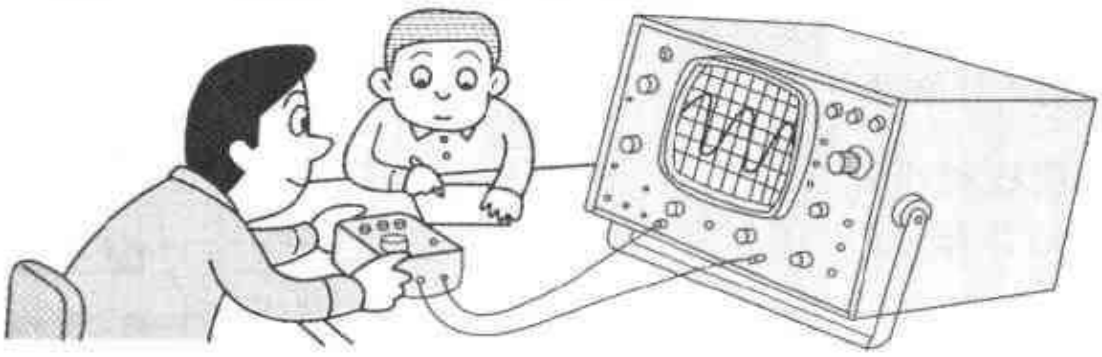
### 触发扫描方式



若在示波器输入端施加待观测的波形，由此产生锯齿波。由待观测的波形提供时间轴的扫描，使波形非常稳定。



# 9 同步示波器的使用方法



## 同步示波器的面板

同步示波器也称为触发式示波器，它是由输入波形进行触发，自动调整同步的示波器。示波器面板上的主要旋钮如图 1 所示。



图 1　同步示波器的面板





- INTENSITY: 调节图形的亮度。
- FOCUS: 调节图形聚焦。
- HORIZONTAL LEVEL: (Trigger level)同步调节旋钮（一般为自动调节），不同步时，手动调节 Level 旋钮。
- TIME/CM: 调节图形宽度。由此可读取周期。
- VOLTS/CM: 调节图形幅度。由此可读取电压。
- POSITION↔: 左右移动图形。
- POSITION ↕ : 上下移动图形。

## 测量什么

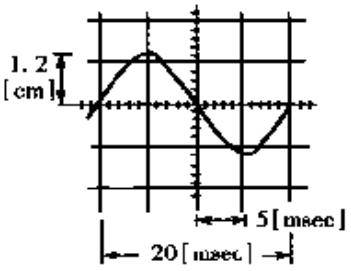
同步示波器可以观测波形。然而，不观测波形时，看看还能测量什么呢?

可以测量直流与交流的电压及电流。还可以测量交流波形的周期与频率。尤其是在测量脉冲波的脉宽时发挥了威力。另外，形成**李萨育图形**也可以测量频率、相位差、功率、调制度等。不进行测量时也可以与微机组合产生图形。



典型的测量示例如下:

**交流电压的测量**




把"VOLTS/CM","TIME/CM"的内侧旋钮调到"CALB"位置。
把"VOLTS/CM"的旋钮调到"10"位置。
把"TIME/CM"旋钮调到 5[ms]位置。
} 这时显示出左图那样的图形。

电压的**最大值**为 1.2 [cm] × 10 [V/cm] = 12 [V]。

**有效值** $= \dfrac{12}{\sqrt{2}}$ [V], **平均值** $= \dfrac{2}{\pi} \times 12$ [V]

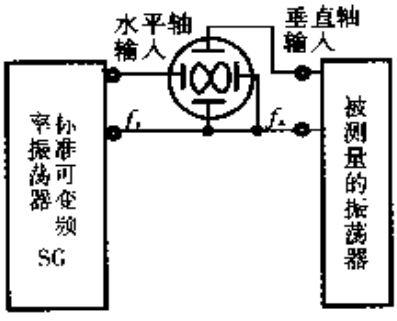


**频率**: 沿横轴移动 1[cm] 需要 5[ms] 时间。因此, 1 个周期为 4[cm], 即为 20 [ms]。所以

$$f = \frac{1}{20 \times 10^{-3}} = 50 \text{ [Hz]}$$



**利用李萨育图形测量频率**




注 1: 10 以上之比值测量较难。

将"TIME/CM"的旋钮调到 EXT · HORIZ。

内侧的旋钮调到 "CALB"。转动标准可变频率振荡器 SG 的刻度盘,利用图形,如下图那样可求出 $f$ 与 $\theta$。

| $f_x:f_y$ | 0° | 45° | 90° |
|---|---|---|---|
| 1:1 | | | |
| 2:1 | | | |

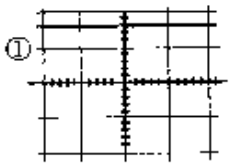
| $f_x:f_y$ | 0° | 45° | 90° |
|---|---|---|---|
| 3:2 | | | |
| 4:3 | | | |



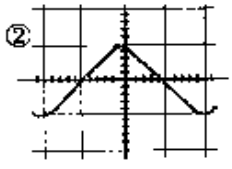


**试画出李萨育图形**

由①、②波形试求直流电压,交流电压与频率。




直流电压的
VOLTS/CM 为 50[mV]




交流电压的
VOLTS/CM 为 10[V]
TIME/CM 为 0.5[ms]

【答案】①

直流电压 $V = 1.6 \times 50$ [mV] = 80 [mV]

【答案】②

交流电压 $V_{max} = 1 \times 10$ [V] = 10 [V]

周期 $T = 4 \times 0.5$ [ms] = 2 [ms]

频率 $f = 1/T = 1/2 \times 10^{-3} = 500$ [Hz]



# 10 周期与时间的测量




## 测量周期

有关周期在正弦波一节中已介绍过，周期是波形重复出现所需的时间。因此，周期的测量与时间测量都可同样考虑。较低频率的信号可以用电子示波器进行测量，但精度不高。使用**数字式**比**模拟式**好。图 1 示出周期测量的原理，图 2 示出构成框图。

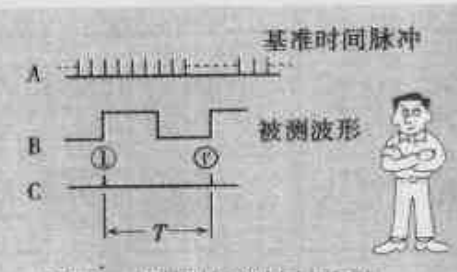



图 1 周期的测量原理

❶ 产生周期为 1[μs]等的**基准时间脉冲**。

❷ 对图中 B 所示的被测波形进行整形，产生如图中 C 所示的脉冲。

❸ 从①开始对基准时间脉冲计数，到Ⓟ为止。

❹ 用计数器对此数进行计数。



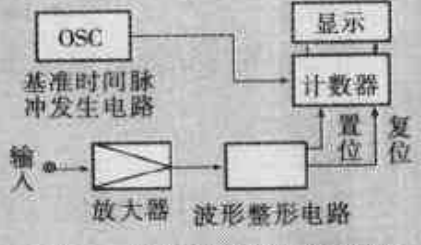


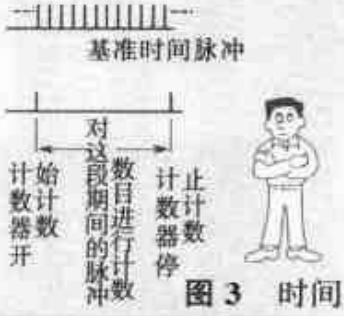

图 2 周期测量仪的构成

数字式一般不受输入电压或温度变化的影响，操作比较简单，所以测量结果以数字方式表示很方便。



## 测量时间

自古以来，时钟（秒表）等使用模拟式。然而，现在，在各体育场见到的时钟都使用数字式。时间测量也与周期测量一样，对产生的基准时间脉冲进行计数，原理如图 3 所示，结构如图 4 所示。




❶ 产生周期为 0.01(s)左右的基准时间脉冲。
❷ 用按钮开关等启动计数器，对脉冲进行计数。
❸ 用按钮开关等使计数器停止计数。
❹ 如果对这段期间的脉冲数目进行计数，就可以测量时间。

图 3　时间测量的原理

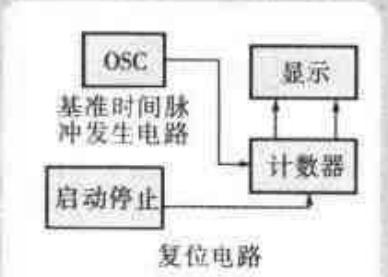



图 4　时间测量仪的构成



**One point**

数字式仪表的电源即使接通也不要马上使用，因为振荡器尚未达到稳定。振荡器稳定需要几十分钟时间。否则在短周期测量中会产生较大误差。

**Let's try**

### 试用长度表示周期



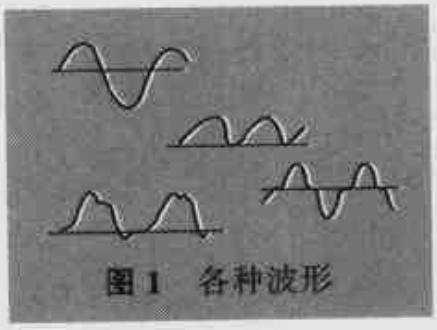
❶ 周期测量及时间测量采用数字方式都是一样的。
❷ 基准时间的周期随目的不同可长可短。
周期不用时间[s]表示，而用长度[m]表示时，可由 $300 \times 10^6 \times$ 周期求出。
$300 \times 10^6$[m/s]是电磁波的传播速度。$10^6 = 1\ 000\ 000$。
❸ 50Hz 的周期为 20[ms]。试用长度表示 1 个周期。
【答案】 $300 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-3} = 6\ 000$ [km]



# 11 数字式频率计




## 数字式频率计的构成


图1 各种波形

**频率是周期的倒数**。因此，若测量出周期，就可以计算出频率，但现在主要使用数字测量方式，这里主要介绍这方面内容，有关模拟方式在下节介绍。数字式频率计的输入有如图 1 所示的各种波形。另外，由于输入电平过低将不能工作，因此，如图 2 所示，测量仪表中需要有**放大器**、**波形整形电路**与**计数器部分**。这种测量仪表的精度非常高，但受计数器的基准时间影响较大。

## 各部分工作原理

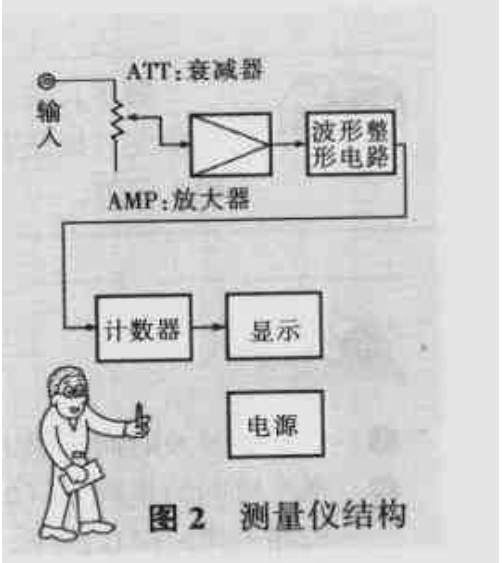


图2 测量仪结构

**ATT：衰减器** 在输入电平较高的情况下，为避免损坏测量仪表而需接入衰减器。在进入测量前，对输入有较大衰减。

**AMP：放大器** 输入电平较低时，对波形无法进行整形，在这种场合下，要对电平进行放大。

**波形整形电路** 若送入计数器的波形发生各种变化，则计数器就会时而工作，时而出现误动作。因此，要将输入波形整理为一定的波形作为计数器的输入。一般整形为**方波脉冲**。

**计数器部分** 其构成如图 3 所示。采用 1[MHz]的**晶体振荡器**。输出经



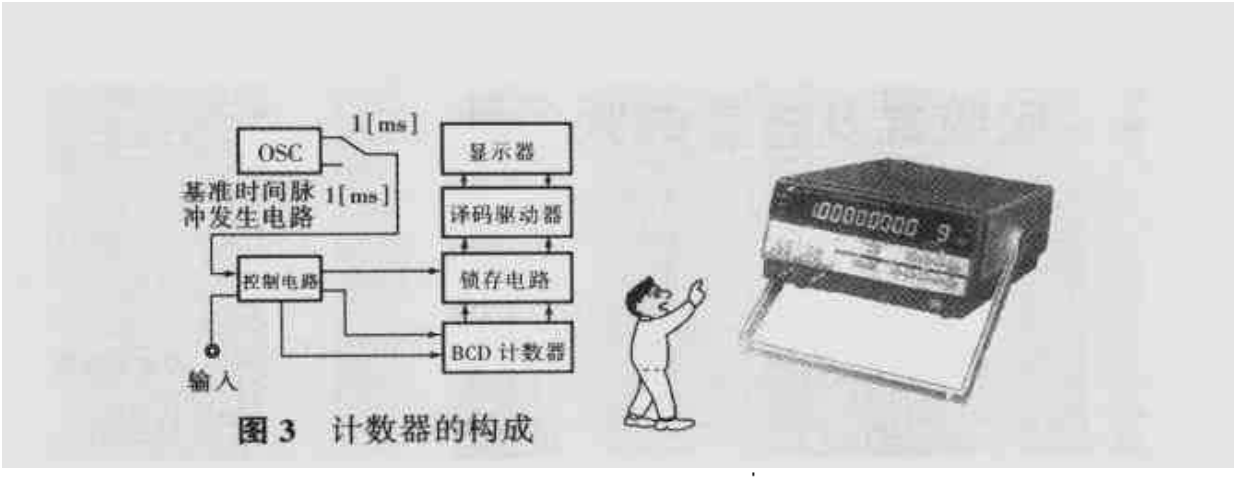
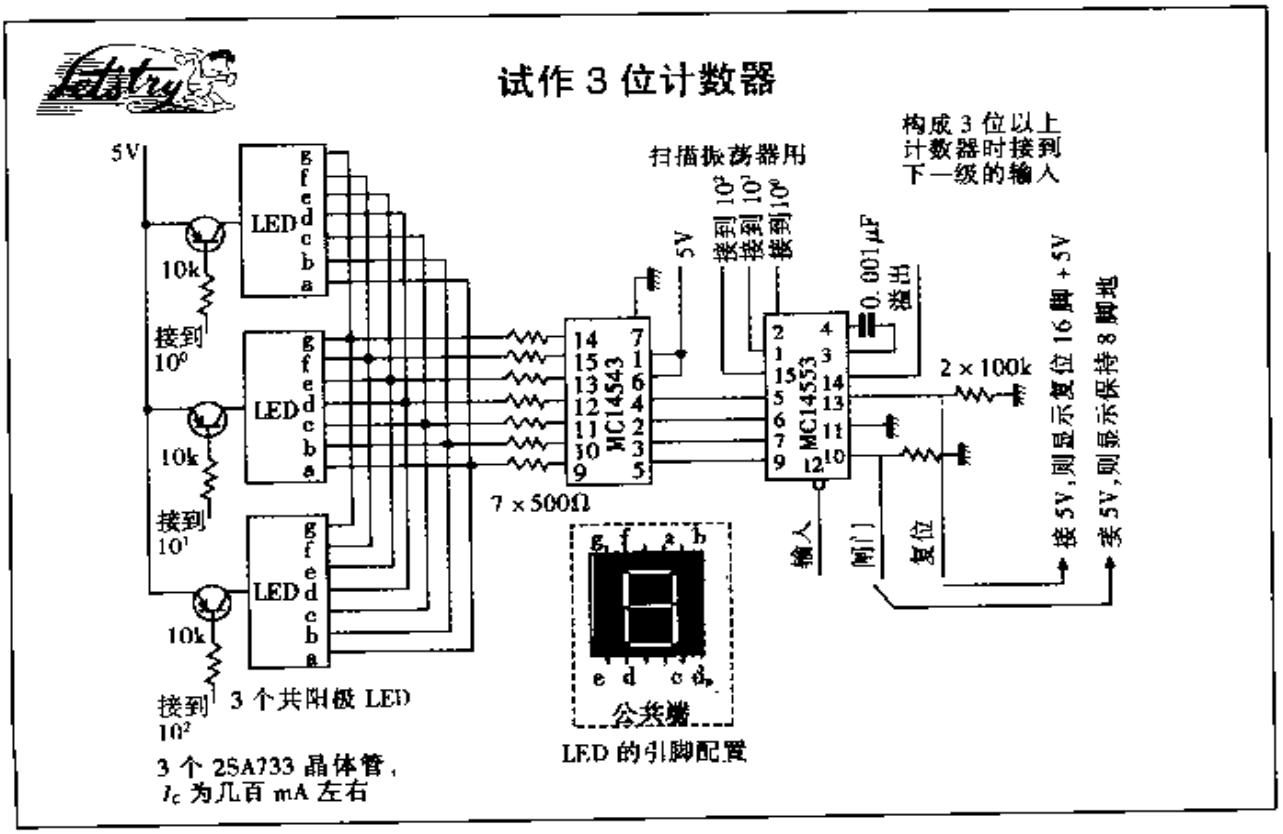



图 3　计数器的构成

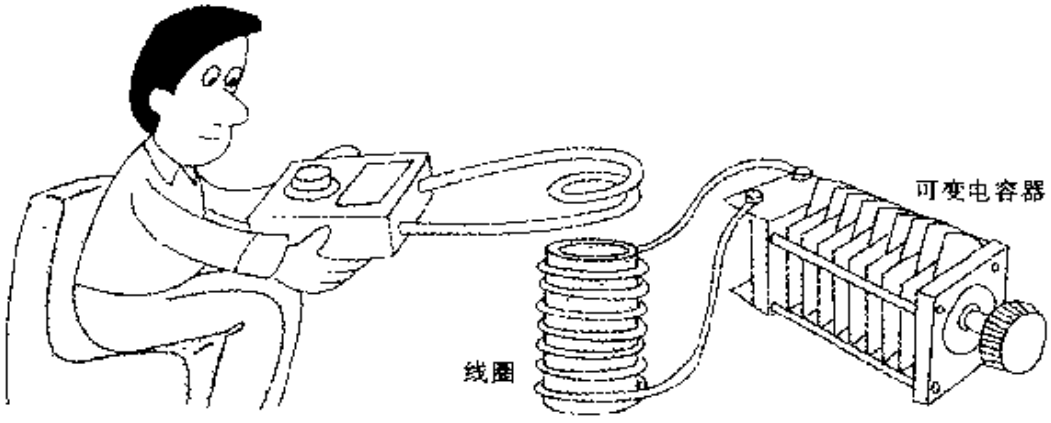
**分频**，获得 1[ms]或 1[s]脉冲，用它仅在 1[ms]或 1[s]时间之内打开闸门，由计数器对通过它的**脉冲**数进行计数。其输出由锁存电路作**暂时存储**而不显示。显示一般使用 7 段显示器。显而易见，若打开闸门的位置不正确就会产生误差。因此，要把振荡器放入**恒温槽**中。另外，还会引入计数值为 ±1 的误差。

计数器是数字测量仪表的通用部分。我们使用的数字时钟也属于计数器。

对几十兆赫以上的频率进行测量时，要用**分频电路**，对输入进行分频后再测量。而在测量低频率时，会产生较大误差。



# 12 吸收式及外差式频率计




## 何谓吸收式频率计

用于测量振荡电路频率的最简单的频率计是利用 ***LC* 谐振现象**的仪表。根据测量频率范围的不同，采用的测量方式也不同。仪表种类及测量频率范围如表 1 所示。用于测量较低频率的 ***LC* 电路方式**，一般称为**吸收式**，其原理如图 1 所示。由图可见，若谐振电路的 $L$ 靠近未知频率的电源，则电**磁耦合**的作用在 $L$ 中产生高频电压。若改变 $C$ 使之谐振，则(μA)表指针示出最大偏转。由此，可求出 $f_x = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ [Hz]。根据测量范围的不同，可以进行 $L$ 的多种更换。根据 $C$ 与 $f$ 的校正表可读出频率。一般来说，$C$ 的刻

表 1　利用谐振现象的频率测量方法

| 仪表种类 | 适用频率 |
|---|---|
| 振动片式频率计 | 工频频率 |
| 吸收式频率计 | 几十 kHz ~ 200MHz 左右 |
| 蝶形电路频率计 | 200MHz ~ 500MHz 左右 |
| 勒贝尔线式频率计 | VHF ~ UHF |
| 同轴频率计 | UHF |
| 空腔频率计 | UHF ~ SHF |

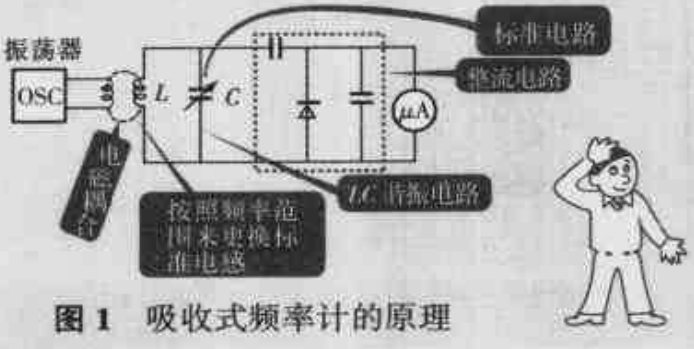



图 1　吸收式频率计的原理





图 2

度盘上直接有 $f$ 的刻度。测量精度为百分之几。

### 何谓外差式频率计

这是比较法的典型仪表，可在高频的全频段（LF～UHF）内使用。这种方式分为内**插法**与**差拍法**，但原理相同。其构成如图 3 所示。原理简介如下：已知频率的内置式可变频率振荡器的输出同未知频率进行混频，再进行**外差式检波**，以耳机不发出声音（零差拍）为准，改变可变振荡器的频率。由此，未知频率与内置式可变频率振荡器的频率相等，这样就可测量出未知频率。精度为 $10^{-3}$～$10^{-4}$。




图 3　外差式频率计的构成






输入信号强度与内部振荡器的强度相差较大时，就难以得到零差拍。由于振动与冲击等使振荡频率发生变动。要用标准信号对晶体振荡器进行校正。






**试归纳一下使用时的注意事项**

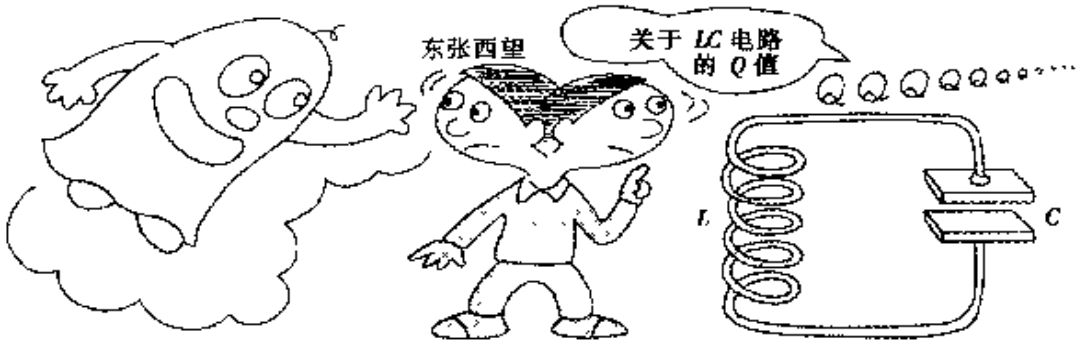
测量仪表刚接通电源开关时不能马上使用。因为有频率漂移，一般在接通电源几十分钟以后才可使用。

对于吸收式频率计来说，由于振荡电路吸收能量，因此，振荡频率会发生变化。所以，电磁耦合要采用松耦合。

对于吸收式、外差式频率计来说，共同之处在于，若被测频率含有失真，则产生高次谐波振荡。有必要注意此点。

“漂移”：指测量值等随着温度与经历的时间发生变化。对于外差式频率计来说，电源接通以后的一段时间内，内置式振荡器的频率会发生改变。

# 13 Q表的原理




## 何谓 $Q$ 值?

我认为 $Q$ 值在第 5 章12中已经有所介绍,因而这里带有复习性质,作一简单介绍。

在图 1 所示的**串联谐振电路**中,**谐振时** $V_L$ 与 $V_C$ 的大小相等,方向相反。这时,$I_0 = V/r$ 为最大,因此,

$$V_L = I_0 \omega L = \frac{V}{r}\omega L$$

与

$$V_C = I_0 \frac{1}{\omega C} = \frac{V}{r\omega C}$$

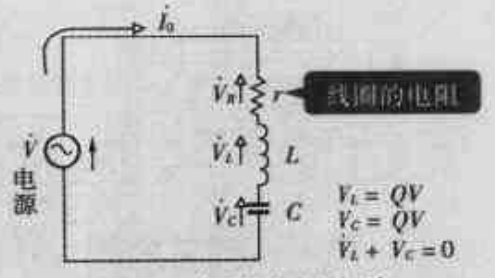
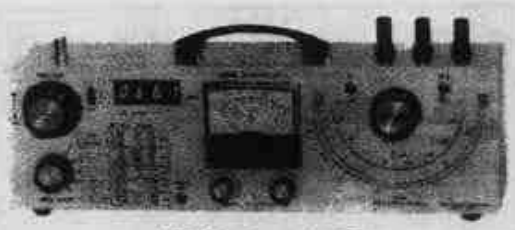



图 1 串联谐振电路



照片 1 Q表

相等。即 $\omega L/r = \dfrac{1}{r\omega C} = Q$,这相当于电压放大倍数。若 $Q$ 变大,则 $L$ 与 $C$ 端电压变为**电源**电压的 $Q$ 倍。这个原理应用于各种电路中。人们使用的收音机、电视机、无线电收发两用机等也应用这个原理。

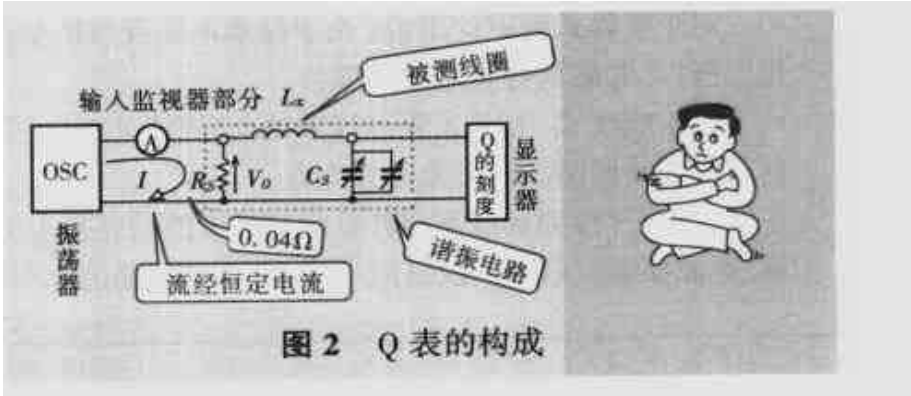
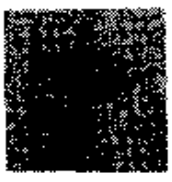



图 2 Q表的构成

## 何谓 Q 表?工作原理是什么

Q 表是利用谐振现



象的原理，简单地直读谐振电路 $Q$ 值的一种仪表，其构成如图 2 所示。振荡部分供给谐振电路以一定电压，与电容 $C_S$ 发生谐振，读取此电压。一般按 $Q$ 值进行刻度。

## 用 $Q$ 值计算什么？

根据测量的 $Q$ 值，可以计算出线圈的电感、电阻与分布电容，以及电容器的容量与损耗角正切值 ($\tan\delta$)、绝缘体的介电常数与功率因数、高频电缆的传输损耗等。图 3 和图 4 分别示出 $L$ 与 $C$ 的测量情况。

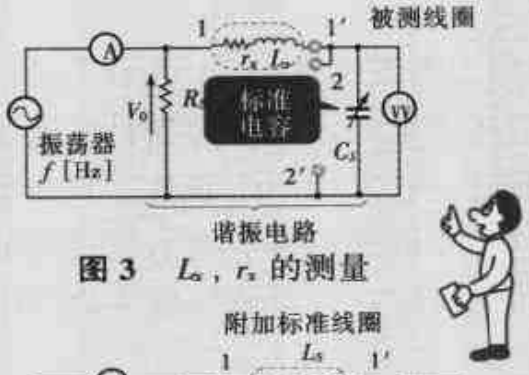



图 3　$L_x$，$r_x$ 的测量

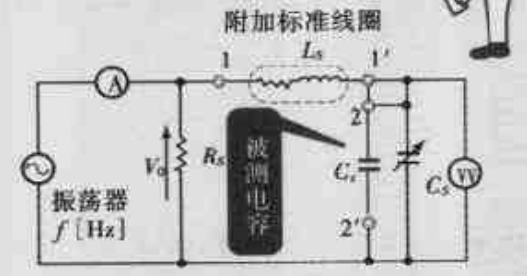



图 4　$C$ 的测量

忽略线圈的分布电容

❶ 改变 $C_S$，使 VV 表读数达到最大值。这时读取 $Q$ 与 $C_S$ 以及 $f$ 值。

❷ 由 $Q=\dfrac{\omega L_x}{r_x}=\dfrac{1}{r_x\omega C_S}$

得线圈电阻 $r_x=\dfrac{1}{Q\omega C_S}$ [Ω]

电感 $L_x=\dfrac{Qr_x}{\omega}=\dfrac{1}{\omega^2 C_S}$ [H]

当 $C_x < C_i$ 时，

❶ 在不接 $C_x$ 情况下，谐振时的 $C_S$ 作为 $C_1$。

❷ 接 $C_x$ 情况下，谐振时的 $C_S$ 作为 $C_2$。

则有 $C_x = C_1 - C_2$。

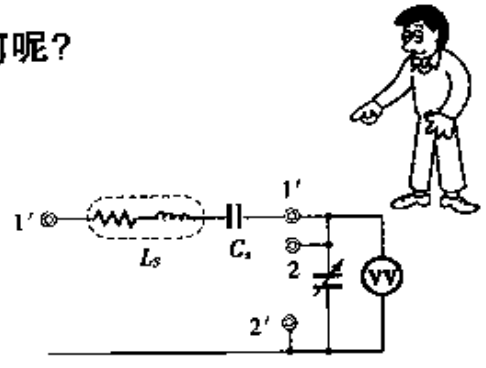
### Let's try　$C_x > C_i$ 时将是如何呢？

标准电容 $C_i$ 为 450[pF] 左右。因此，$C_x > C_i$ 时，如右图所示。测量方法与图 4 相同。则有

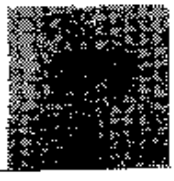
$$C_x=\frac{C_1C_2}{C_2-C_1}$$

Q 表也要在接通电源后经过几十分钟再进行测量。

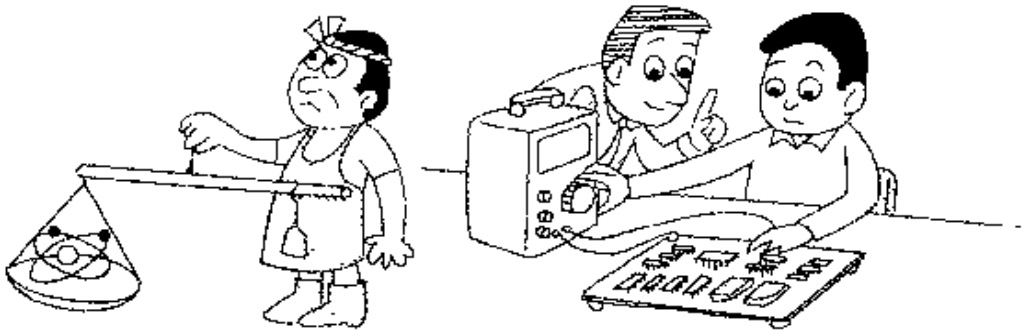
Q 表的 A 因是高频电流表（热电偶式），要慢慢操作以免流经过大电流。





# 14 电子(电子管)电压表



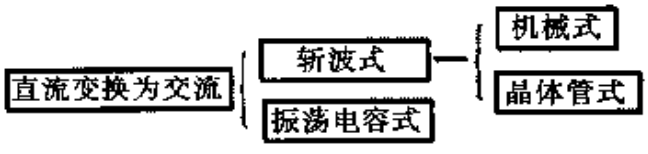
## 何谓电子测量仪表

测量电压与电流以及其它电量的仪表称为**电工仪表**。其中电量不经过放大就可使仪表盘上的指针偏转，从而可直接读数的仪表称为**指针式电工仪表**。另外，测量累计量的仪表称为**累计电工仪表**，家用的**电表**就是其典型代表。水表、煤气表等也是累计仪表。与这些不同的还有需把电量进行放大，再采用其它辅助设备(装置)进行测量的仪表，把这类测量仪表称为电子测量仪表。

## 何谓电子电压表

电子**电**压表(电子管式)大致分为**直流电压测量用**与**交流电压测量用**两种。测直流电压要使用直流放大器，但因有零点漂移的问题，所以采用如表1所示的方式，先把直流变为交流，再对交流进行放大，以便使仪表指针偏转。这

**表1 直流→交流变换方式**



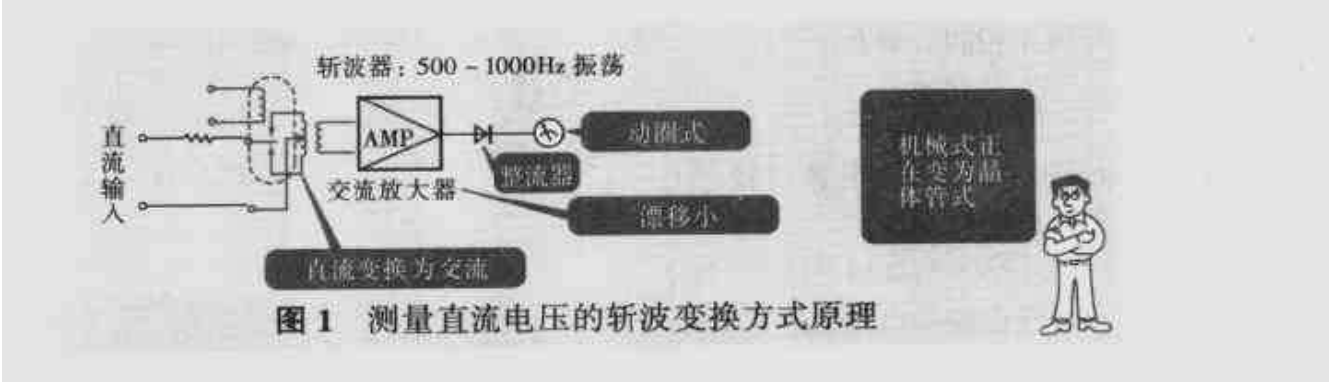
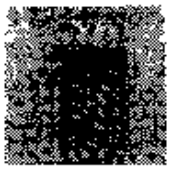




**图1 测量直流电压的斩波变换方式原理**



种变换方式的典型示例如图 1 所示。这样可构成**输入阻抗高**、灵敏度也高的仪表。用斩波式仪表测量电压可达 $10^{-6}$[V] 左右的灵敏度，测电流可达 $10^{-11}$[A]左右，振动电容式仪表的测量灵敏度，测电压可以做到 $10^{-5}$[V]左右，测电流为 $10^{-17}$[A]左右。另外，交流电压表有用宽带放大器直接放大待测量的电压，使仪表指示的方式，但测量频率最高只能到 10[MHz]左右，因此，测量高频时，如图 2 所示，要把交流变换为直流进行测量。若采用这种方式，频率可达 100[MHz]左右。这也可以构成输入阻抗高、灵敏度也高的

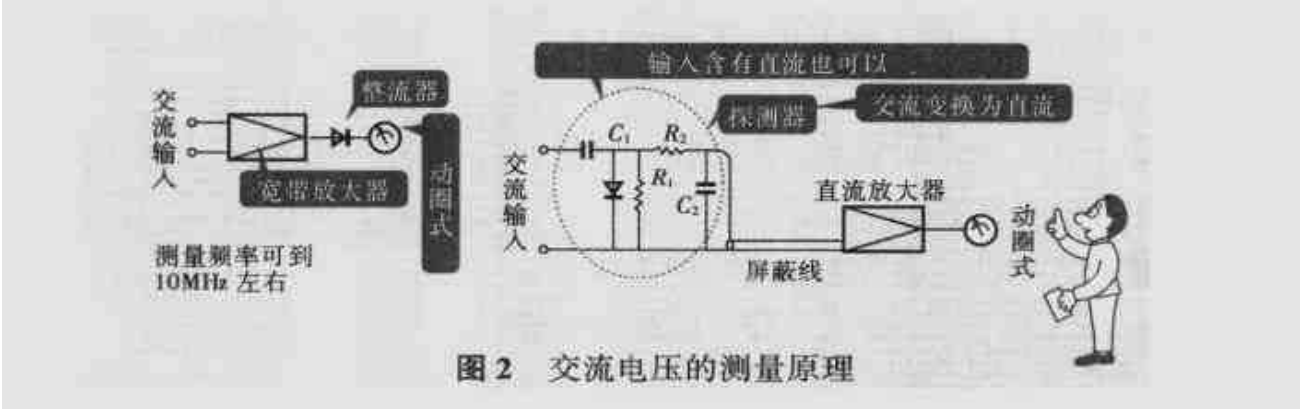
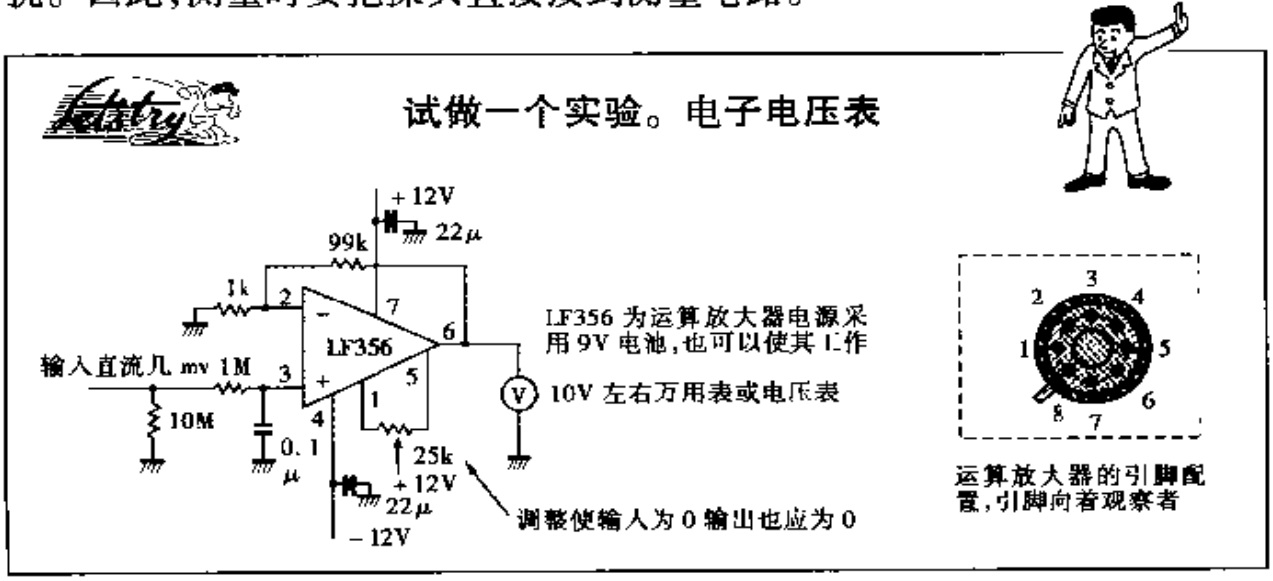



图 2　交流电压的测量原理

仪表。

若仪表的输入阻抗高，测量电路即使接到待测量端子，对测量电路的电路参数也几乎没有影响。另外，还有从测量电路中获取的功率非常小的优点。测量高频电压时，若从测量电路到输入端子(探头)的接线较长，由于此阻抗与杂散电容的影响，不能获得正确的测量值，或产生意想不到的干扰。因此，测量时要把探头直接接到测量电路。





# 本章小结



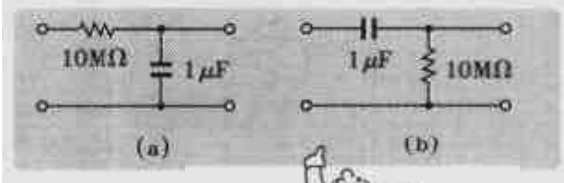
**1.** 学习 2 中有关失真率的内容

基波有效值为 100V，第 3 次谐波有效值为 10V，第 5 次谐波有效值为 5V，请求出这种失真波的失真率。

**2.** 学习 2 中有关脉冲的内容。人的脉搏(pulse)本身就是脉冲波。

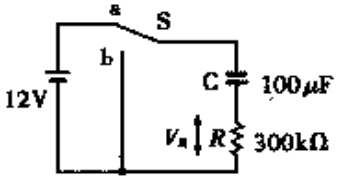
对于 $\tau / T = 1/5$ 的方波，$T = 0.1[\mu s]$。若只考虑到第 5 次谐波，最高频率是多少?

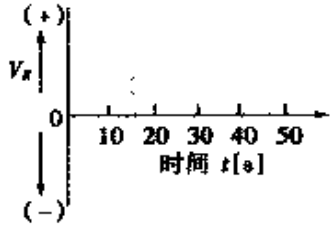
**3.** 7 中学习过时间常数。试求出右图所示电路的时间常数。






**4.** 2 中学习过过渡现象。试做一个实验。




❶ S 扳向 b 侧。

❷ 设 S 扳向 a 侧时为 $t = 0$，在 10 秒间隔之后试测量 $V_R$，$V_R$ 几乎为 0，再将 S 扳向 b 侧，试同样测量 $V_R$。

❸ 由此试作出曲线图。

❹ 由曲线图试求出时间常数。试把它同 $CR$ 进行比较。

注：　为了避免电压表内阻的影响，请用电子电压表。

**5.** 与读取指针在刻度盘上的偏转得到测量值的指针式仪表之类的模拟式仪表相对比，数字式仪表是直接用“数字”来显示测量值的仪表。模拟式仪表有直观看到测量值的优点，但对于数字式仪表来说，增加位数就可以提高测量精度。

答案　1. 失真率 $= \dfrac{\sqrt{10^2 + 5^2}}{100} \times 100 \approx 11.2\ [\%]$

2. $f = \dfrac{1}{0.1 \times 10^{-6}} \times 5 = 50\ [\mathrm{MHz}]$

3. (a)与(b)都一样，$CR = 1 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{6} = 10\ [\mathrm{s}]$





## 21 世纪电子电气工程师系列

| | | | |
|---|---|---|---|
| 电磁学 | [日]高木正藏 编 | 赵立年等 译 | A5 19 00 |
| 电力电子学 | [日]楠木一幸 编 | 耿连发等 译 | A5 19 00 |
| 自动控制 | [日]春木 弘 编 | 卢伯英 译 | A5 15 00 |
| 数字电路 | [日]常深信彦 编著 | 白玉林 译 | A5 15 00 |
| 模拟电路 | [日]吉永 淳 编 | 黄永直 译 | A5 19 00 |
| 电机电器 | [日]吉永 淳 编著 | 冯 浩 译 | A5 19 00 |
| 信息处理 | [日]常深信彦 编著 | 冯 杰 译 | A5 16 50 |
| 通信技术 | [日]吉永 淳 编 | 徐国鼎等 译 | A5 18 00 |
| 电力系统 | [日]丹羽信昭 编 | 金晶立 译 | A5 16 00 |
| 电工电路 | [日]吉冈芳夫 编著 | 刘冬梅等 译 | A5 19 50 |
| 图像电子学 | [日]常深信彦 编 | 薛培鼎 译 | A5 16 00 |
| 接地技术与接地系统 | [日]川濑太郎 编著 | 冯允平 译 | A5 11 00 |
| 半导体器件 | [日]春木 弘 编著 | 邵志标 译 | A5 16 00 |

## 21 世纪大学新型新参教材系列

| | | | |
|---|---|---|---|
| 集成电路 A<br>集成电路 B | [日]荒井英辅 编著 | 邵春林 蔡凤鸣 译 | A5 24 00 |
| 半导体工程学 | [日]中嶋坚志郎 编著 | 熊 缨 译 | A5 12 00 |
| 电子器件 | [日]梅野正义 编著 | 邵春林 王 钢 译 | A5 12.00 |
| 光电子学 | [日]神保孝志 编著 | 邵春林等 译 | A5 12 00 |
| 电气电路 A<br>电气电路 B | [日]佐治 学 编著<br>[日]日比野伦夫 编著 | 王友功 译<br>刘晓萱 译 | A5 24 00 |
| 电气数学 | [日]齐藤制海 编著 | 崔东印 译 | A5 12 00 |
| 高电压/绝缘工程学 | [日]小崎正光 编著 | 李福寿 译 | A5 12.00 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 等离子体电子工程学 | [日]菅井秀郎 | 编著 | A5 12 00 |
| 电力系统工程学 | [日]大久保仁 | 编著 | 提兆旭 译 A5 12 00 |
| 电气电子材料 | [日]水谷照吉 | 编 | 王力衡 译 A5 12 00 |
| 电气能源基础 | [日]押原建树 | 编著 | A5 12 00 |
| 电力电子学 | [日]堀 孝正 | 编著 | 李世兴 译 A5 12 00 |
| 信号分析 | [日]日井支郎 | 编著 | 何希才 译 A5 12 00 |
| 系统与控制 | [日]细江繁幸 | 编著 | 白玉林 译 A5 12 00 |

## 21 世纪工程技术新型教程系列

| | | | |
|---|---|---|---|
| 光通信与无线通信系统 | [日]木村磐根 | 编著 | 杨明君等 译 A5 25 00 |
| 机电一体化 | [日]高森 年 | 编著 | 赵文珍 译 A5 18 00 |
| 机器人工程 | [日]白井良明 | 编著 | 王棣棠 译 A5 20 00 |
| 通信工程学概论 | [日]木村磐根 | 编著 | 李树广 译 A5 20 00 |
| 电力传输工程 | [日]松浦虔士 | 编著 | 曹广益 译 A5 23 00 |
| 系统工程 | [日]田村坦之 | 编著 | 李 平 译 A5 16 00 |
| 信号处理 | [日]酒井英昭 | 编著 | 白玉林 译 A5 20 00 |
| 信息媒体工程 | [日]美浓导彦 西田正吾 | 编著 | 白玉林 译 A5 23 00 |
| 传感工程 | [日]井口征士 | 编 | 蔡 萍等 译 A5 17 00 |

## OHM 实用手册系列

| | | | |
|---|---|---|---|
| 电 工 | [日]柱井 诚 | 主编 | 吕砚山 译 A5 39 80 |
| 电 子 | [日]藤井信生 | 主编 | 王力衡等 译 A5 39 80 |
| 机电一体化 | [日]三浦宏文 | 主编 | 赵文珍等 译 A5 38 00 |
| 图解电气大百科 | [日]曾根 悟 小谷 诚 | 向殿政男 | 主编 A5 125 00 |

机　械

[日]土屋喜一　主编
A5　69 00

## OHM 电子电气入门丛书

图解电子电路　[日]福田　务　栗原　丰　向坂荣夫　著　丁国骏　译
A5　21 00

图解电与磁　[日]福田　务　著　赵立竹　译
A5　16 50

图解电气电子测量　[日]熊谷文宏　著　王益全　译
A5　17 50

图解晶体管电路　[日]饭高成男　椎名晴夫　田口英雄　著　蒋铃鸽　译
A5　18 50

图解运算放大器电路　[日]内山明治　村野　靖　著　陈镇超　译
A5　21 00

图解电子电路的计算　[日]栗原　丰　向坂荣夫　福田　务　著　陈　敏　译
A5　16 00

图解数字电路　[日]内山明治　堀江俊明　著　曹广益　译
A5　17 00

图解数字电路的计算　[日]饭高成男　椎名晴夫　田口英雄　著　钱允琪　译
A5　17 50

图解电力技术　[日]福田　务　相原良典　著　提兆旭　译
A5　18 00

图解电力应用　[日]木村博司　粉川昌巳　著　程君实　译
A5　19 00

图解电机电器　[日]饭高成男　泽间照一　著　李福寿　译
A5　18 00

图解通信　[日]伊藤　稔　石井坚太郎　大园博明　桥本三男　著　何　晨　译
A5　19 00

图解电路　[日]岩泽孝治　中村征寿　著　李福寿　译
A5　20 50

图解电路计算　[日]浅川　毅　著　邹俊忠等　译
A5　17 00

图解电气理论　[日]栗原　丰　向坂荣夫　福田　务　著　程君实　译
A5　24 00

图解电气理论计算　[日]栗原　丰　向坂荣夫　福田　务　著　颜　萍　译
A5　19 00

## OHM 电子电气入门丛书—电子电气读本系列

图解电工学入门　[日]OHM　编　何希才等　译
A5　25 00

图解电子学入门　[日]OHM　编　薛培鼎等　译
A5　25 00

图解日英汉电气/电子/信息/词典　[日]新电气编辑部　编
A5　27 00

## OHM 电子电气入门丛书电子电路讲座

晶体管电路　　[日]曾和将容　著　　邹振民　译　　A5　16.50

放大电路　　[日]砂泽　学　著　　商福昆　译　　A5　5.00

振荡/调制解调电路　　[日]小柴典居　堤田佳典　著　　李　平　译　　A5　6.00

脉冲电路　　[日]清水贤资　鸿田五郎　著　　彭　斌　译　　A5　12.00

数字电路　　[日]清水贤资　曾和将容　著　　白玉林　译　　A5　14.00

图解放大电路设计　　[日]喜安善市　伏见和郎　主编　小柴典居　著　　白玉林　译　　A5　20.00

## 图解电子电路系列

电路基础　　[日]饭高成男　著　　张建荣　译　　A5　16.00

模拟电路 I　　[日]佐野敏一　高木宣昭　竹内　守　著　　张建荣　译　　A5　14.00

模拟电路 II　　[日]柄本治利　真真田胜久　著　　张建荣　译　　A5　15.00

脉冲电路　　[日]菅谷光雄　中村征寿　著　　何希才　译　　A5　15.00

数字电路　　[日]伊藤恭史　著　　韦　琳　潘桂堂　译　　A5　17.00

## 图解电子电路习题集系列

电路基础习题集　　[日]饭高成男　著　　何希才　译　　A5　15.00

模拟电路 I 习题集　　[日]佐野敏一　高木宣昭　竹内　守　著　　吕砚山　译　　A5　17.50

模拟电路 II 习题集　　[日]真真田胜久　柄本治利　著　　吕砚山　译　　A5　12.50

脉冲电路习题集　　[日]菅谷光雄　中村征寿　著　　何希才　译　　A5　14.00

## 图解机电一体化入门系列丛书

机电一体化电子学入门　　[日]妹尾允史　著　　金寿日　译　　A5　18.00

信号处理入门　　[日]佐藤幸男　著　　宋伟刚　译　　A5　16.00

数字控制入门　　[日]高木章二　著　　王禄汾　译　　A5　20.00

CAD/CAM/CAE 入门　　[日]安田仁彦　著　赵文珍　译　A5　17.00

控制用微机入门　　[日]末松良一　著　刘本伟　译　A5　19.00

接口电路入门　　[日]藤原　修　著　张家齐　译　A5　17.00

传感器入门　　[日]雨宫好文　著　洪淳赫　译　A5　16.50

机械控制入门　　[日]末松良一　著　王献平　高　航　译　A5　15.00

电子机械控制入门　　[日]妹尾允史　著　白玉林　商福昆　译　A5　14.00

机器人控制入门　　[日]大熊　繁　著　王益全　译　A5　16.50

控制用电机入门　　[日]松井信行　著　王棣堂　译　A5　16.00

电子机械控制入门　　[日]妹尾允史　著　白玉林　商福昆　译　A5　14.00

机器人控制入门　　[日]大熊　繁　著　王益全　译　A5　16.50

控制用电机入门　　[日]松井信行　著　王棣堂　译　A5　16.00

电子机械控制入门　　[日]妹尾允史　著　白玉林　商福昆　译　A5　14.00

机器人控制入门　　[日]大熊　繁　著　王益全　译　A5　16.50

控制用电机入门　　[日]松井信行　著　王棣堂　译　A5　16.00

## 图解建筑装饰设计系列

实用混凝土大全　　[日]冯乃谦　主编　A5　186.00

图解室内装饰设计方法　　[日]小宫荣一　著　阮志大　王炜钰　译　A5　21.00

图解室内装饰设计基础与技巧　　[日]楢崎雄之　著　冯乃谦　译　A5　24.00

图解室内装饰材料选择与使用　　[日]小宫荣一　著　冯乃谦　译　A5　20.00

图解室内装饰设计图选择与使用　　[日]尾上孝一　著　史其信　译　A5　20.00

图解设计表示图法入门　　[日]定松修三　定松润子　著　陆化普　史其信　陈　娟　译　A5　21.00

图解店铺的规划与设计　　[日]楢崎雄之　著　冯乃谦　译　A5　23.00

图解室内照明 [日]小泉 实 著 邸更岩 李文林 译 A5 32 00

图解建筑设备知识 [日]山田信亮 打久濑二 井上国博 冈田诚之 曾我部繁 著 卢有杰 卢莉云 译 A5 16 00

图解隔震结构入门 [日]日本免震构造协会 编 叶列平 译 A5 25 00

图解店铺装潢设计图—读图和绘图 [日]山本洋一 著 杨静等 译 A5 25 00

图解住宅建筑图—读图和绘图 [日]吉松正行 松泽哲次郎 唐洋俊明 近藤佐三 著 冯乃谦 邢锋 译 A5 21 00

图解建筑结构设计计算 [日]山田修 著 卢有杰等 译 A5 30 00

图解洗手间设计与维护 [日]坂本菜子 著 乔春生 张培军 译 A5 48 00

图解写字楼设备设计指南 [日]空气调和·卫生工学会 编 杨明君 叶湘 译 A5 23 00

图解大厦设备基础百科 [日]设备和管理编辑部 编 A5 35 00

## 科龙网络技术系列

数字同步传输 SDH 系统 [日]河西宏之 横一光 辻久雄 著 杨明君 译 A5 12 00

光接入网技术 [日]山下一郎 川濑正明 太田纪久 著 杨明君 许秀英 译 A5 12 00

图解 B—ISDN 宽带综合业务数字网 [日]立川敬二 石川宏 著 金文雄 强增福 译 A5 28 00

## 图解音响录音技术丛书

图解录音制作入门 [日]相泽昭八郎 高和元彦 半田健一 著 何希才 张凤梧 贾波 尤克 译 A5 16 00

图解录音技法入门 [日]若林骏介 著 何希才 唐绳斌 高扬 译 A5 28 00

图解数字音响技术 [日]伊藤公史 著 韦琳 潘桂堂 译 A5 15 00

图解 CD 制激光数字唱片系统 [日]中岛平太郎 小川博司 著 袁稚林 译 A5 19 00

图解数字磁带录音机 [日]中岛平太郎 小高健太郎 著 何希才 张凤梧 译 A5 24 00

本书著作权和专有出版权受到《中华人民共和国著作权法》的保护，凡对本书的一部分或全部进行转载、或用复印机进行复制或在其它场合引用，以及录入电子设备等行为，均属侵害著作权，构成违法。

本书如需复制、引用、转载、改编时，必须得到版权所有者的许可。

如有任何疑问请与以下部门联系，联系时请尽量使用信函或传真形式。

**科学出版社**总编合作部　电话：010－64034529　　传真：010－64019810

邮政编码：100717　　地址：北京市东黄城根北街16号

http://www.sciencep.com

北京东方科龙电脑图文制作有限公司　电话：010－82857401　传真：010－82842304

邮政编码：100029　　地址：北京市朝阳区华严北里11号楼2层

http://www.okbook.com.cn